



**João Paulo
Nunes Rocha Angeja**

**Modelação de redes sem fios para comunicações
multimédia**



**João Paulo
Nunes Rocha Angeja**

**Modelação de redes sem fios para comunicações
multimédia**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor António Navarro, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro.

O Júri

Presidente

Prof. Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Fernando Manuel Bernardo Pereira
Professor Associado do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

Prof. Doutor Luís Alberto da Silva Cruz
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor António José Nunes Navarro Rodrigues
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Cabe-me aqui expressar a minha profunda e sincera gratidão a todos aqueles que, de algum modo, colaboraram comigo ao longo deste trabalho.

Ao Professor António Navarro, meu Orientador Científico, pela oportunidade que me deu, pela disponibilidade apresentada e pelas condições que me proporcionou na realização deste trabalho. Agradeço, também, por todos os conhecimentos que me foram transmitidos e pelo acompanhamento e revisão atenta que concedeu a esta dissertação.

Ao Instituto de Telecomunicações, por me ter dado condições em termos de recursos humanos, instalações e equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

À Marinha Portuguesa, Philips RCS e Agência de Inovação pelas Bolsas de Investigação Científica concedidas no âmbito dos projectos de Investigação e Desenvolvimento que colaborei.

palavras-chave

comunicações multimedia, 802.11g, STANAG 5066, RTP, SIP, perda de pacotes

resumo

As técnicas de codificação, transporte e transmissão de sinais digitais multimédia têm evoluído significativamente na última década. Têm sido publicados uma grande quantidade de estudos e normas relativos às questões acima referidas.

Essencialmente, esta dissertação discute as normas da camada de transporte e apresenta resultados relativos à qualidade duma comunicação multimédia multiplexada em pacotes. Ao nível da camada de rede, o protocolo IP (*Internet Protocol*) tem servido não apenas para endereçamento mas também para a interligação de redes de telecomunicações, com tecnologias heterogéneas nas camadas inferiores (ligação e física). Acima da camada de rede, a informação fonte comprimida é encapsulada e transportada pelos protocolos UDP (*User Datagram Protocol*) e RTP (*Real Time Transport Protocol*). O objectivo destes protocolos de transporte/sessão é identificar a existência de erros nos dados fonte e associar informação de sincronismo e sequência. Esta informação permite o receptor minimizar os efeitos dos erros de comunicação e sincronizar diferentes conteúdos de media.

Esta dissertação apresenta as técnicas de encapsulamento usadas num sistema de comunicação áudio-visual sobre um canal de onda curta HF (*High Frequency*). Estas técnicas foram estudadas no âmbito do projecto NAVIO (Navy Video), apoiado pela Marinha de Guerra Portuguesa. Para além disso, são apresentados alguns resultados relacionados com as perdas de pacotes que permitem avaliar a qualidade dos sinais reconstruídos na recepção. O principal objectivo do projecto é investigar e implementar um serviço de videoconferência, terra-navio. O sistema de comunicação sobre HF apresentado nesta dissertação utiliza apenas 4 kbps, dos quais 2 kbps são usados para a codificação do áudio e os outros 2 kbps para a codificação de alguns parâmetros que representam a face humana.

Esta dissertação apresenta também um estudo semelhante para a rede IEEE 802.11g em resultado do trabalho realizado no projecto TRIVIAL (Transmissão Rádio Interactiva de Video Local) apoiado pela Philips-RCS (*Remote Control System*) e pela Agência de Inovação.

Como resultado do conhecimento obtido, do estudo de ambas as redes em separado, é feita a análise da possibilidade de implementar um sistema constituído por duas redes locais sem fios ligadas por um canal HF. Esta análise permite prever a perda de pacotes duma comunicação multimédia caracterizada segundo o seguinte cenário: um terminal inserido numa rede local sem fios em terra a comunicar com um terminal inserido numa rede sem fios existente num navio, permanecendo ambas ligadas por um canal HF.

keywords

multimedia communications, 802.11g, STANAG 5066, RTP, SIP, packet loss

abstract

In the last decade, the coding techniques and transmission of digital multimedia has evolved significantly. Here have been published an enormous amount of papers, reports and standards concerned with the issues mentioned above.

Generally speaking, this thesis discusses some standards related to the transport layer and presents some results related to the quality of a packetized multimedia communication. At the network layer, the IP (Internet Protocol) has served, not only for routing, but also for the interconnection of diverse telecommunications networks with heterogeneous technologies at lower layers (link and physical). Above the network layer, the compressed source data is encapsulated and transported making use of UDP (User Datagram Protocol) and RTP (Real Time Transport Protocol) protocol structures. The main goal of these transport/session protocols are to signal any communications errors and to include synchronization information as well as inserting packet sequence numbers.

This thesis presents the encapsulation techniques used in an audio-visual communication system over a HF (High Frequency) channel. These techniques were studied in the NAVIO (Navy Video) project framework, a project supported by the Portuguese Navy. Furthermore, this thesis presents some results related to packet loss which allow us to evaluate the quality of the reconstructed signals at the receiver. The main goal of NAVIO project is to research and develop a video conference service running on earth and war vessel stations. The communication system over HF spends 4 kbps, in which 2 kbps are used for audio encoders and the remaining 2 kbps for encoding some face animation parameters.

This thesis also presents a similar detailed study for IEEE 802.11g wireless network in consequence of a research work carried out in the TRIVIAL (*Transmissão Rádio Interactiva de Vídeo Local*) project supported by Philips-RCS (Remote Control System) and *Agência de Inovação*.

As a result of the obtained knowledge, from both networks study, we analyse the possibility of implementing an interconnected platform thereby, two wireless local networks are connected by a HF link. This analysis allow us to estimate the multimedia packet loss under the following scenario: a terminal as part of a wireless local network in earth, connected to a terminal as part of another wireless local network in a war vessel where both networks are interconnected by a HF link.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABELAS	vii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 REDES DE COMUNICAÇÕES MULTIMÉDIA SOBRE IP	5
2.1. Modelo de rede ISO/OSI	6
2.2. <i>Internet Protocol</i>	8
2.3. Comunicações tempo real, <i>streaming</i> e <i>download</i>	8
2.4. <i>Session Initiation Protocol</i>	10
2.5. <i>Real Time Streaming Protocol</i>	10
2.6. <i>Real Time Transport Protocol</i>	11
2.7. <i>Network Time Protocol</i>	13
2.8. <i>Session Description Protocol</i>	14
2.9. Redes sem fios	14
CAPÍTULO 3 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MULTIMÉDIA SOBRE HF	17
3.1. Comunicação sobre canal HF	20
3.2. Camada de ligação STANAG 5066	21
3.3. <i>Framing</i> na camada física STANAG 4539	24
3.4. Análise do dimensionamento dos pacotes	26
3.5. Metodologia de simulação de perda de pacotes	31

3.6. Técnica de encapsulamento e resultados obtidos	33
3.7. Diversidade com dois canais HF	41
Capítulo 4 Sistema comunicações multimédia sobre WLAN	47
4.1. Arquitectura de rede da IEEE 802.11 WLAN	50
4.1.1 <i>Distributed Coordination Function</i>	52
4.1.2 <i>Point Coordination Function</i>	54
4.2. Estudo e modelação da perda de pacotes	56
4.2.1 Motivação do estudo	56
4.2.2 Modelo GE	57
4.2.3 Modelo perda de pacote proposto	58
4.2.4 Plataforma de teste e resultados	61
4.2.5 Resultados Experimentais	64
4.2.6 Teste Qui-Quadrado	67
4.2.7 Débitos de transmissão para o vídeo	69
4.2.8 Importância do modelo proposto	70
CAPÍTULO 5 SISTEMA TOTAL COM REDES HF E WLAN	77
5.1. Implementação do “HF Gateway”	77
5.2. Análise de sincronização da sessão multimédia	79
5.2. Testes de funcionamento da plataforma	80
5.2.1 Medida de atraso do <i>modem</i>	80
5.2.2 Envio de pacotes de voz pelo <i>modem</i>	81
5.2.3 Testes de campo	82
5.2.4 Descrição dos testes laboratoriais	82
5.2.5 Teste infra-estrutura HF	85
5.3. Estimativa da perda de pacote resultante das duas redes	88
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS	97
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de rede ISO/OSI.	6
Figura 2. Cabeçalho do pacote RTP.	11
Figura 3. Enquadramento dos protocolos no modelo de rede ISO/OSI.	15
Figura 4. Sistema de comunicação multimédia sobre canais HF.	19
Figura 5. Sistema de comunicação HF.	21
Figura 6. Encapsulamento segundo a pilha protocolar ISO/OSI.	21
Figura 7. <i>Type 7 Non-ARQ D_PDU</i> .	24
Figura 8. Estrutura da <i>Frame</i> para todas as formas de onda.	25
Figura 9. Diagrama do simulador do canal HF.	33
Figura 10. Percentagem de perda pacote com 75 <i>bytes</i> de <i>payload</i> do RTP.	36
Figura 11. Percentagem de perda pacote com 100 <i>bytes</i> de <i>payload</i> do RTP.	37
Figura 12. Percentagem de perda pacote com 150 <i>bytes</i> de <i>payload</i> do RTP.	37
Figura 13. Percentagem de perda pacote com 200 <i>bytes</i> de <i>payload</i> do RTP.	38
Figura 14. Percentagem de perda pacote com 225 <i>bytes</i> de <i>payload</i> do RTP.	38
Figura 15. Percentagem de perda pacote com 300 <i>bytes</i> de <i>payload</i> do RTP.	39
Figura 16. Selecção das curvas com menor perda pacote.	40
Figura 17. Curvas com melhor desempenho para SNR inferior a 15 dB.	40
Figura 18. Percentagem perda pacote (condições canal <i>good</i> e sem diversidade).	42
Figura 19. Percentagem perda pacote (condições canal <i>good</i> e com diversidade).	42
Figura 20. Percentagem perda pacote (condições canal <i>moderate</i> e sem diversidade).	43

Figura 21. Percentagem perda pacote (condições canal <i>moderate</i> e com diversidade).	43
Figura 22. Percentagem perda pacote (condições canal <i>poor</i> e sem diversidade).	44
Figura 23. Percentagem perda pacote (condições canal <i>poor</i> e com diversidade).	44
Figura 24. Pilha protocolar na norma 802.11.	48
Figura 25. “IBSS” ou “Rede <i>ad-hoc</i> ”.	50
Figura 26. Modo de acesso Infra-estrutura.	51
Figura 27. Ligação entre dois BSS através do DS.	51
Figura 28. Procedimento de contenção de acesso ao meio.	53
Figura 29. Troca pacotes RTS e CTS.	54
Figura 30. Transmissão <i>frame</i> CF-Poll.	56
Figura 31. Modelo <i>Gilbert-Elliot</i> .	58
Figura 32. Topologia da rede para os cenários de teste.	63
Figura 33. Comprimento de consecutivos pacotes perdidos na Sta2, cenário S21.	65
Figura 34. Comprimento de consecutivos pacotes recebidos na Sta2, cenário S21.	65
Figura 35. Comprimento de consecutivos pacotes perdidos na Sta1, cenário S11.	66
Figura 36. Comprimento de consecutivos pacotes recebidos na Sta1, cenário S11.	66
Figura 37. Correlação cruzada para o débito R1 no cenário S41 e Sta2.	67
Figura 38. Valores de $\hat{\theta}$ vs débito de transmissão de pacotes e bits na Sta1.	70
Figura 39. Curva da melhor aproximação a $\hat{\theta}$ na distribuição de pacotes perdidos.	70
Figura 40. Percentagem média de perda de pacotes de áudio.	71
Figura 41. Valor de MOS resultante de áudio corrompido pela rede.	72
Figura 42. Percentagem média de perda de pacotes de vídeo.	72
Figura 43. Perda de qualidade de vídeo para MPEG-4.	73
Figura 44. Perda de qualidade de vídeo para H.264.	74
Figura 45. Ilustração do posicionamento do “HF Gateway”.	78
Figura 46. Diagrama de blocos do <i>WLAN/HF Network Gateway</i> .	78
Figura 47. Fluxo de mensagens SIP.	80
Figura 48. Topologia de rede.	82
Figura 49. Topologia de rede usada para testes laboratoriais.	85
Figura 50. Topologia de rede usada para testes de campo.	86
Figura 51. Perda pacote HF e WLAN (canal HF <i>good</i> e sem diversidade).	89
Figura 52. Perda pacote HF e WLAN (canal HF <i>good</i> e com diversidade).	90

Figura 53. Perda pacote HF com duas WLANs (canal HF <i>good</i> e sem diversidade).	90
Figura 54. Perda pacote HF com duas WLANs (canal HF <i>good</i> e com diversidade).	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Funcionalidades das camadas do modelo ISO/OSI.	7
Tabela 2. Tipos de C_PDU.	23
Tabela 3. Débitos em bps do payload de RTP.	28
Tabela 4. Débitos em bps do payload RTP com compressão IP/UDP/RTP.	30
Tabela 5. Débitos em bps do payload RTP com compressão IP/UDP/RTP.	31
Tabela 6. Parâmetros de comunicação.	34
Tabela 7. Débitos de transmissão em bps.	35
Tabela 8. Débitos de transmissão conseguidas com a multiplexagem OFDM.	49
Tabela 9. Bandas de frequência da rede 802.11	49
Tabela 10. Cenários de teste. Débitos de transmissão usados.	62
Tabela 11. Parâmetro para todos os casos dos cenários testados.	64
Tabela 12. Resultados do teste Qui-Quadrado.	68
Tabela 13. Qualidade MOS dos codificadores de voz.	71
Tabela 14. Parâmetros codificador de vídeo MPEG-4.	73
Tabela 15. Parâmetros do codificador de vídeo H.264.	74
Tabela 16. Débitos do canal HF com compressão do cabeçalho do RTP.	83
Tabela 17. Débitos do canal HF sem compressão do cabeçalho do RTP.	83
Tabela 18. Casos possíveis.	84
Tabela 19. Casos de transmissão bem sucedidos.	87
Tabela 20. Percentagem de perda de pacote no receptor.	87

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As redes sem fios têm sido alvo de uma enorme atenção por parte das comunidades académica e empresarial. O investimento destinado à sua investigação e melhoramento está numa fase crescente. O número de grupos de investigação a trabalhar nesta área tem vindo a crescer consideravelmente. Além disso, as tecnologias multimédia têm também sentido um grande impulso, proveniente da digitalização dos conteúdos e das modernas técnicas de codificação. Por estas razões, o uso de redes sem fios para comunicações multimédia não poderia deixar de ser um assunto actual.

Neste trabalho é feito o estudo do desempenho de duas redes sem fios para comunicações multimédia. A primeira rede analisada é baseada em canais HF (*High Frequency*). Estes canais são caracterizados por oferecerem comunicações sem fios de longo alcance, constrangidas por débitos baixos, inferiores a 12800 bps. A segunda rede estudada é uma WLAN (*Wireless Local Area Network*) conhecida por 802.11. Esta rede é caracterizada pelo seu curto alcance de comunicação, inferior a 300 m em linha de vista, e por débitos na ordem das dezenas de Mbps, em condições ideais.

A motivação do estudo das redes indicadas, está relacionada com dois projectos realizados no Pólo de Aveiro do Instituto de Telecomunicações, nos quais o autor da presente dissertação colaborou activamente. O primeiro projecto designado por NAVIO (*Navy Video*), encomendado pela Marinha de Guerra Portuguesa, teve como objectivo principal criar um sistema de comunicações multimédia em tempo real, sobre a infra-

estrutura de canais HF. A adversidade e o baixo débito de transmissão digital que caracteriza os canais HF, impõe à partida limitações na criação dum sistema do tipo pretendido. O estudo efectuado relativo à perda de informação, revelou-se muito importante no dimensionamento do sistema a ser desenvolvido. O segundo projecto designado por TRIVial (Transmissão Rádio Interactiva de Vídeo Local), executado em parceria com a empresa Philips RCS, teve como objectivo principal criar uma plataforma de entretenimento sobre a rede 802.11. Embora esta rede comporte altos débitos de comunicação, a qualidade desta pode ser significativamente comprometida pela sobrecarga da infra-estrutura da rede.

Os estudos efectuados em ambas as redes, focaram-se na análise de perda de pacotes durante a transmissão de conteúdos multimédia sobre as redes indicadas. Esta análise é feita individualmente para cada uma das redes, partindo de metodologias distintas. A metodologia seguida para a comunicação HF, baseia-se em informação de perda de pacotes obtida por simulação do canal HF. No caso da WLAN, a metodologia utilizada, assenta na medida de perda de pacotes transmitidos numa infra-estrutura de rede real. Em ambos os casos, após a recolha dos padrões de perda de pacotes, estes foram analisados estatisticamente, de forma a prever o comportamento das redes em estudo. No caso da rede de maior débito, o estudo resultou ainda na construção dum modelo de perda de pacotes, que caracteriza esta rede sob as condições estudadas.

Os pacotes utilizados para a transmissão de conteúdos multimédia são do tipo RTP (*Real Time Protocol*), e a sua escolha prende-se com o facto destes pacotes transportarem informação de sincronização temporal e sequência dos conteúdos multimédia transportados. Note-se, que para os estudos efectuados, o campo de *payload* dos pacotes RTP é composto por *bytes* aleatórios que simulam conteúdos multimédia.

Após os estudos efectuados para cada rede em separado, realizou-se uma análise final, prevendo o comportamento da integração de ambas as redes a servirem de suporte a um possível sistema de comunicação multimédia, extremo a extremo. Esta análise final, embora não testada na realidade, é resultado do conhecimento adquirido no decorrer dos estudos executados. O sistema idealizado é constituído por uma ligação HF entre dois “HF Gateways” para duas redes WLAN 802.11. Saliente-se que é apenas esperado um serviço sobre a rede HF, enquanto se espera que sobre as redes locais estejam a correr dezenas de

serviços. Neste cenário as redes, HF e WLAN, comportam débitos muito diferentes, para além de outras limitações inerentes ao canal HF.

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Após o primeiro capítulo introdutório, são apresentados no segundo capítulo conceitos e protocolos envolvidos nas comunicações multimédia emergentes sobre a rede IP (*Internet Protocol*). O terceiro e quarto capítulos são dedicados à apresentação do estudo estatístico de perda de pacotes nas duas redes sem fios anteriormente mencionadas. Para a rede WLAN é proposto um modelo estatístico de perda de pacotes. O quinto capítulo apresenta o sistema integrado com as duas redes, bem como a previsão do desempenho, extremo a extremo, em termos de perda de pacotes. Por exemplo, com uma relação sinal/ruído superior a 25 dB no canal HF e permanecendo este em condições de canal *good*. Se aplicarmos a solução de diversidade na frequência proposta neste trabalho, com um tráfego da ordem dos 12 Mbps nas redes locais, a perda de pacotes ronda os 10% na comunicação multimédia extremo a extremo. Finalmente, o último capítulo é reservado a conclusões alcançadas no decorrer do trabalho apresentado.

Os estudos apresentados nesta dissertação contribuíram para as publicações dos seguintes artigos:

- L. Carvalho, J. Angeja, A. Navarro, “*A New Packet Loss Model of the IEEE 802.11g Wireless Network for Multimedia Communications*”, IEEE *Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 51, No. 3, Agosto 2005.
- J. Tavares, J. Angeja, L. Carvalho, A. Navarro, “*Increasing HF Radio Communication Capacity to Support Real Time Video*”, ISCE, Macau, China, Junho 2005.
- J. Angeja, L. Carvalho, A. Navarro, “*802.11g WLAN Modeling for Real Time Packet Communication*”, PIMRC, Barcelona, Espanha, Setembro 2004.
- J. Angeja, L. Carvalho, A. Navarro, “*Real Time Packet Communication Modeling in 802.11g WLAN*”, IST *Mobile & Wireless Communications Summit*, Lion, França, Julho 2004.
- A. Navarro, J. Angeja, J. Tavares, R. Rodrigues, L. Carvalho, F. Perdigão, “*Audio-visual Conference through the Ionosphere at 4 kbps*”, IEEE ICME, Taipei-Taiwan, Junho 2004.

- A. Navarro, R. Rodrigues, J. Angeja, J. Tavares, L. Carvalho, F. Perdigão, “*An Error-resilient Approach for Real-time Packet Communications by HF-channel Diversity*”, SPIE – *Digital Wireless Communications*, Orlando, Florida, USA, Abril 2004.
- A. Navarro, R. Rodrigues, J. Angeja, J. Tavares, L. Carvalho, F. Perdigão “*Video Conference over HF Packet Radio Channels*”, MILCOM, Boston, USA, Outubro 2003.
- M. Rostami, J. Angeja, J. Tavares, A. Navarro “*HF Channel Modelling for Real Time Packet Transmission*”, SPIE – *Digital Wireless Communications*, Orlando, Florida, USA, Abril 2003.

Foram ainda realizadas as seguintes demonstrações públicas:

- A. Navarro, J. Angeja, “*Video Conference over HF Packet Radio Channels*”, IEEE CCNC, Las Vegas, USA, Janeiro 2004.
- A. Navarro, R. Rodrigues, J. Angeja, J. Tavares, L. Carvalho, F. Perdigão, “*Multi-Conference over HF Packet Radio Channels*”, IEEE ICME, Taipei-Taiwan, Junho 2004.

CAPÍTULO 2

REDES DE COMUNICAÇÕES MULTIMÉDIA SOBRE IP

O presente capítulo é dedicado a introduzir conceitos e protocolos envolvidos nas comunicações multimédia sobre redes IP. Inicialmente é apresentado o modelo de rede ISO/OSI (*International Standard Organization's Open System Interconnect*) que permite, de forma abstracta, estruturar segundo uma pilha protocolar a interacção entre diferentes tecnologias. Seguidamente é introduzido o protocolo IP e são dadas algumas razões pelas quais este protocolo possibilita a convergência entre redes heterogéneas.

A terceira secção é reservada à distinção entre comunicações tempo real, *streaming* e *download*. Esta distinção é importante para a compreensão dos constrangimentos que uma comunicação tempo real impõe relativamente aos outros tipos de comunicação.

As seguintes secções resumem uma selecção de protocolos importantes no contexto das comunicações multimédia. A selecção é iniciada pela descrição de dois protocolos de sincronização de sessões multimédia com funcionalidades distintas e utilizados nos projectos NAVIO e TRIVial. Seguidamente enfatiza-se o protocolo RTP e são detalhadas as funcionalidades para transporte de conteúdos multimédia. Por último, são sumariamente apresentados dois protocolos de suporte às comunicações multimédia, designados por NTP (*Network Time Protocol*) e SDP (*Session Description Protocol*). Estes protocolos são usados, respectivamente, no suporte à sincronização temporal e descrição dos conteúdos multimédia. O presente capítulo termina com o enquadramento das redes sem fios estudadas no modelo ISO/OSI.

2.1. Modelo de rede ISO/OSI

As redes de comunicações envolvem, actualmente, um conjunto de várias tecnologias que ao interagirem entre si resultam numa diversificação de soluções de comunicação. A diversidade tecnológica abrange desde as técnicas de digitalização e transmissão do sinal adequado ao próprio meio de transmissão, até às técnicas de interacção aplicacional. Em termos abstractos, as diversas tecnologias envolvidas nas redes de comunicação podem ser estruturadas em sete camadas segundo o modelo de rede ISO/OSI. A Figura 1 apresenta as sete camadas de abstracção das tecnologias envolvidas, em qualquer rede de comunicações. Não é obrigatório que um sistema de redes de comunicações abranja todas as camadas especificadas pelo modelo ISO/OSI, podendo mesmo abranger apenas uma ou duas camadas.

Cada uma das sete camadas do modelo é caracterizada por funcionalidades próprias, as quais complementam e interagem com as funcionalidades das camadas imediatamente inferior e superior. A Tabela 1 apresenta a descrição das funcionalidades de cada uma das camadas ilustradas na Figura 1.

Camada de Aplicação
Camada de Apresentação
Camada de Sessão
Camada de Transporte
Camada de Rede
Camada de Ligação
Camada Física

Figura 1. Modelo de rede ISO/OSI.

Tabela 1. Funcionalidades das camadas do modelo ISO/OSI.

Camadas	Funcionalidades
Aplicação	Define interacção com utilizador final.
Apresentação	Formatação da informação, recorrendo a metadados (informação sobre informação). Compressão da informação, recorrendo a codificação digital.
Sessão	Define sessões de comunicação aplicacional. Controlo e gestão de sessões aplicacionais.
Transporte	Transporte de informação aplicacional entre dois pontos da rede. Endereçamento ao nível de portos dentro de cada elemento de rede. Controlo de erros na informação.
Rede	Identificar diferentes elementos de rede em domínios lógicos distintos (redes). Interligar múltiplas redes. Endereçamento extremo a extremo dos elementos de rede. Definir caminhos/rotas de interligação entre redes.
Ligação	Assegura a partilha e gestão do meio físico entre elementos de rede. Endereçamento ponto a ponto dos elementos de rede. Detecção e correcção de erros de informação.
Física	Conversão de informação binária em sinais físicos (eléctricos, ópticos ou rádio). Transmissão e recepção dos sinais físicos. Define dimensões e características dos conectores e antenas, dependendo do meio físico de propagação e respectivas características dos sinais.

2.2. *Internet Protocol*

O protocolo IP, especificado pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*), permite um endereçamento extremo a extremo entre elementos de rede interligados por diferentes tecnologias de rede, aos níveis da camada de ligação e da camada física. Este protocolo apresenta funcionalidades da camada de rede segundo o modelo ISO/OSI. Estas funcionalidades tornam-no como o protocolo eleito para a convergência de redes, criando um nível de abstracção entre as camadas inferiores e superiores do modelo ISO/OSI. A convergência é feita a partir da interligação de redes heterogéneas abaixo da camada de rede numa rede global com endereçamento IP. A versão 4 [1] do protocolo IP começa a ter uma limitação de endereços disponíveis devido à intensa recorrência a este tipo de endereçamento e à restrição dos 32 bits usados para a gama de endereços possíveis. Esta limitação é resolvida com a versão 6 [2] do protocolo IP, onde a gama de endereços disponíveis subiu significativamente para um endereçamento de 128 bits.

Sendo o IP o protocolo de eleição para o endereçamento global extremo a extremo, é inevitável que as comunicações multimédia o utilizem para suportar o endereçamento. Neste sentido, vários grupos de trabalho do IETF têm especificado protocolos próprios para comunicações multimédia sobre IP. São exemplos de protocolos específicos para comunicações multimédia o SIP (*Session Initiation Protocol*) [3] e o RTP (*Real Time Transport Protocol*) [5] especificados, respectivamente, para controlo de sessões multimédia e transporte de conteúdos multimédia.

2.3. *Comunicações tempo real, streaming e download*

As comunicações de tempo real e *streaming* são substancialmente afectadas pelos atrasos e perda da informação no decorrer da comunicação. O *download* é um tipo de comunicação mais permissivo e geralmente caracterizado pela transferência de informação entre dois extremos de rede, onde a informação só é visualizada após o fim da transferência de toda a informação. Para os serviços de *download* são usadas ligações TCP (*Transmission Control Protocol*) [6], a nível da camada de transporte, que garantem o reenvio de informação perdida durante a transferência. Em aplicações de *download* os atrasos e suas variações (*jitter*) causados pelos vários nós da rede, são geralmente bem tolerados e não causam grande prejuízo à eficiência aceitável do serviço. Uma forma

avançada de *download*, é designada por *progressive download*. Neste, a informação pode ser visualizada antes do final da recepção da totalidade da informação pedida. Esta última forma de *download* está sujeita a apresentações precárias da informação, que é transferida, devido à deficiente gestão dos *buffers* de chegada dos conteúdos. A má gestão dos *buffers* é dificultada pela falta de informação de sincronização dos conteúdos e das adversidades impostas pela rede. Nas comunicações em tempo real e *streaming*, os tipos de informação maioritariamente a ser transferidas são o áudio e o vídeo, também designados por conteúdos multimédia. À semelhança das comunicações em tempo real, o *streaming* é sensível ao atraso e sua variação, bem como à perda e ordenação da informação a ser transferida. Geralmente para transporte da informação de áudio e vídeo é usado o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) [13], a nível da camada de transporte, que não garante a entrega dos pacotes que transportam informação. Estes estão sujeitos a chegarem desordenados ao seu destino, relativamente à sua ordem de emissão, ou até mesmo serem perdidos introduzindo ruído na qualidade da comunicação. O serviço de tempo real distingue-se do serviço de *streaming* nas restrições do atraso total da informação ao chegar ao seu destino. O serviço de tempo real é condicionado a atrasos inferiores aos permitidos no *streaming*.

A degradação das comunicações multimédia resulta da congestão do tráfego de pacotes nas rotas usadas pela informação. Os elementos de rede responsáveis pelo encaminhamento dos pacotes têm recursos finitos a nível de memória. A limitação da capacidade da rede é outro elemento constrangedor da qualidade da comunicação. Estas restrições, provocam a sobrecarga dos *buffers* de pacotes nos elementos de rede e a consequente remoção destes pacotes sem que sejam transmitidos. Para prevenir as comunicações multimédia precárias é essencial que exista um aprovisionamento dos recursos de rede usados, tanto a nível do débito de transmissão das ligações como a nível da capacidade de armazenamento temporário dos elementos de rede intermédios. As técnicas de aprovisionamento de rede são designadas por QoS (*Quality of Service*), onde cada sessão de comunicação só é iniciada quando são garantidos os recursos de rede necessários ao seu estabelecimento.

2.4. *Session Initiation Protocol*

Numa sessão de conferência entre dois clientes numa rede, antes de um cliente enviar qualquer tipo de informação multimédia para a rede, deverá saber se existe (pelo menos) um cliente receptor sincronizado consigo. Inicialmente a sincronização é feita recorrendo a um protocolo de controlo de sessão, o qual é responsável pelas seguintes tarefas:

- Localização do cliente;
- Disponibilidade do cliente;
- Capacidades multimédia do cliente;
- Estabelecimento da sessão;
- Gestão da sessão.

O *Session Initiation Protocol* (SIP) [3] é utilizado para controlo duma comunicação com uma arquitectura *peer-to-peer*, em que cada *peer* se comporta como cliente e servidor simultaneamente. Ou seja, cada *peer* está capacitado para receber (agindo como cliente) e enviar (agindo como servidor) conteúdos multimédia. Este protocolo foi parcialmente implementado no sistema de comunicações multimédia em tempo real, no âmbito do projecto realizado para a Marinha de Guerra Portuguesa.

2.5. *Real Time Streaming Protocol*

O RTSP (*Real Time Streaming Protocol*) [4] é um protocolo da camada de sessão, segundo o modelo ISO/OSI, que fornece às aplicações a possibilidade de controlarem uma ou mais sequência sincronizadas de *streams* de um media (áudio, vídeo). O RTSP actua como um controlo remoto para controlar servidores de media. Os conteúdos multimédia são armazenados/gerados num servidor que aceita pedidos de sessões por parte de clientes. Estes pedidos de sessões são efectuados recorrendo ao protocolo RTSP. As fontes dos conteúdos multimédia podem ser originárias de sistemas de aquisição em tempo real (tais como uma câmara de filmar ou microfone) ou a partir de armazenamento num ficheiro. O protocolo RTSP é caracterizado por uma arquitectura de comunicação do tipo cliente-

servidor. Este protocolo é utilizado para controlo de sessões de *streaming*, áudio e vídeo, no contexto da plataforma de entretenimento sobre a rede 802.11 desenvolvida no projecto TRIVial.

2.6. *Real Time Transport Protocol*

O RTP [5] é o protocolo que dá suporte à transmissão de dados de tempo real como áudio e vídeo extremo a extremo. Este protocolo não oferece por si só garantia de qualidade de serviço e é independente da rede de transporte usada. Os pacotes RTP são transferidos normalmente sobre UDP e IP. O RTP destaca-se pelas seguintes funcionalidades:

- Identificação do tipo de dados transportados;
- Sequência de pacotes;
- Sinalização temporal dos dados a transportar;
- Identificação de *substreams*.

O cabeçalho fixo do pacote RTP é ilustrado na Figura 2. Os valores decimais no topo da figura indicam a posição do bit no pacote. Como se pode verificar pela figura, o cabeçalho fixo do pacote tem um comprimento de 12 *bytes*. A zona a tracejado da figura indica um campo opcional, conforme o *payload* a transportar no pacote RTP.

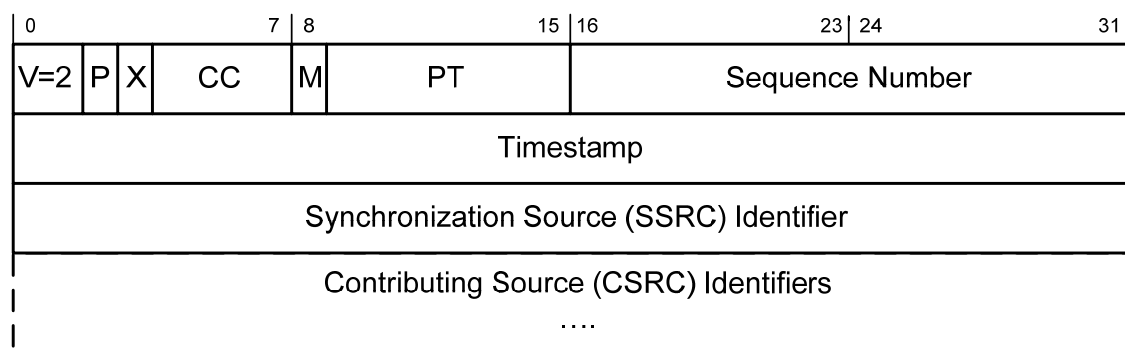


Figura 2. Cabeçalho do pacote RTP.

O cabeçalho fixo é constituído por nove campos binários. A funcionalidade de cada um dos campos é discriminada de seguida:

- “V”: Indica a versão do protocolo RTP a ser usado, neste caso é a versão 2.
- “P”: Indica a existência de um ou mais *bytes* de *padding* no final do *payload* do pacote RTP. O último *byte* do *padding* contém uma contagem do número de *bytes* de *padding* existentes no pacote (incluindo o último *byte*).
- “X”: Indica a existência dum cabeçalho de extensão, após o cabeçalho fixo e a listagem de CSRCs (caso existam).
- “CC”: Indica o número de fontes usadas para criar o conteúdo a transportar, ou seja, o número de campos CSRC presentes logo após o cabeçalho fixo. Este valor varia entre 0 e 15.
- “M”: A interpretação deste campo é definida por perfil. A sua função é permitir eventos significativos, tais como a marcação do limite duma *frame* num fluxo de pacotes.
- “PT”: Identifica o tipo de *payload* a ser transportado dentro do pacote.
- “Sequence Number”: Sequência os pacotes com uma gama de 16 bits. Esta campo serve para detectar pacotes perdidos e ordenar pacotes que cheguem ao cliente fora de ordem.
- “Timestamp”: É a referência temporal do *payload* a ser transportado. Por questões de segurança, o primeiro *timestamp* duma sessão multimédia é gerado aleatoriamente e é considerado como referência temporal zero. Todos os pacotes seguintes terão desvios temporais relativamente ao primeiro pacote. Este campo é baseado no protocolo NTP (*Network Time Protocol*) [11]. Uma descrição sumária do NTP será dada na secção seguinte.
- “SSRC”: É o identificador da subsessão multimédia. No caso de uma sessão multimédia com duas subsessões (uma de áudio e outra de vídeo), deverão existir dois *streams* de pacotes RTP (um por cada subsessão). Cada subsessão terá o seu SSRC. À semelhança do *timestamp*, este valor também deve ser escolhido aleatoriamente.
- “CSRC”: Lista de identificadores que contribuem para o conteúdo do pacote RTP. Este campo apenas está presente quando existe mais do que uma fonte contribuinte

para o conteúdo a transportar no *payload* do pacote RTP. Um exemplo de utilização deste campo é a mistura de vários conteúdos de áudio num só (por parte dum *mixer* de áudio), num cenário de multi-conferência.

Para além do cabeçalho fixo, são especificados pelo IETF cabeçalhos de extensão próprios para cada tipo de *codec* a ser transportado no *payload* do pacote RTP, como por exemplo para o H.261 [7], MPEG-1/MPEG-2 Vídeo [8], MPEG-4 Áudio/Visual [9] e H.264 [10].

O RTCP (*RTP Control Protocol*) é um protocolo associado ao protocolo RTP, cuja principal função é suportar a monitorização da qualidade de entrega dos conteúdos multimédia no seu respectivo destino. Se forem usados codificadores adaptativos esta informação de monitorização pode servir para ajustar o fluxo de dados à qualidade de transporte disponibilizada pela rede. Esta informação é trocada em ambos os sentidos (cliente-servidor e servidor-cliente). De seguida são descritos os tipos de pacotes RTCP usados para transportar a informação de controlo:

- “*Sender Report*”: Usado para veicular estatísticas de transmissão e recepção enviadas por estações que são fontes de conteúdos activas.
- “*Receiver Report*”: Usado para veicular estatísticas de recepção enviados por estações que só recebem.
- “*SDES*”: Usado para transportar itens de descrição da fonte.
- “*BYE*”: Usado para indicar o fim da participação dum extremo.
- “*APP*”: Usado para funções específicas duma aplicação.

2.7. *Network Time Protocol*

O NTP (*Network Time Protocol*) [11] é um protocolo também especificado pelo IETF. O seu principal objectivo é fornecer mecanismos de sincronização temporal. A sincronização, é também coordenada e distribuída segundo o protocolo NTP num ambiente vasto e diverso como a Internet. Esta caracteriza-se por atrasos dependentes das tecnologias de rede usadas e pelos caminhos percorridos entre sistemas computacionais remotos.

A função do NTP não é fornecer “horas” a sistemas computacionais localizados remotamente, mas sim (recorrendo ao seu protocolo de comunicação de redes) minimizar as variações temporais existente entre os mesmos sistemas. Partindo do princípio que os servidores têm um relógio síncrono com o UTC (*Coordinated Universal Time*), estes disponibilizam a informação de sincronismo aos clientes de forma a ser eliminado o deslocamento do seu relógio relativamente ao relógio de referência universal.

O UTC derivou do GMT (*Greenwich Mean Time*) como uma nova fonte de referência de relógio. Esta derivação deve-se ao facto do GMT se basear na rotação da Terra. O referido fenómeno não é suficientemente constante para ser usado como uma medida de tempo precisa. O UTC usa como referência a zona de tempo do GMT para o deslocamento nulo e é baseado numa especificação da duração de um segundo determinado a partir de fenómenos quânticos.

2.8. *Session Description Protocol*

O SDP (*Session Description Protocol*) [12] é um protocolo da camada de aplicação, segundo o modelo ISO/OSI, que dá suporte à descrição das sessões multimédia. Caracteriza-se pela utilização de texto através do qual o servidor descreve os recursos disponíveis. Estes recursos podem ser o tipo e o formato do media a veicular e o endereço IP. Em casos de videoconferência, podem ainda ser trocados os portos (utilizados pelos protocolos TCP ou UDP) segundo os quais será feita emissão/recepção dos conteúdos multimédia, a nível da camada de transporte.

2.9. Redes sem fios

As duas redes sem fios estudadas nesta dissertação enquadram-se nas duas camadas inferiores do modelo ISO/OSI, isto é, camada de ligação e camada física. A rede HF é especificada pelas normas STANAG 4539 [20] e STANAG 5066 [19], a nível da camada física e da camada de ligação, respectivamente. A rede WLAN é especificada pela norma 802.11 [26]. A descrição das redes sem fios são apresentadas com maior nível de detalhe no terceiro e quarto capítulos desta dissertação, respectivamente para as redes HF e WLAN. Nestes capítulos são descritas as funcionalidades das duas redes assim como

alguns constrangimentos inerentes a estas. Em ambos os casos as redes são utilizadas para a transmissão de pacotes RTP sobre a pilha protocolar UDP/IP. O protocolo IP é igualmente assumido como protocolo da camada de rede sobre ambas as redes sem fios, agindo como tecnologia unificadora da comunicação multimédia. A unificação do protocolo IP permite que acima da camada de rede sejam usadas as mesmas pilhas protocolares, de comunicação multimédia, para ambas as redes sem fios. A Figura 3 apresenta o enquadramento dos protocolos apresentados neste capítulo no modelo ISO/OSI. No capítulo seguinte são apresentados os estudos relativos à rede HF.

Protocolos		Camadas ISO/OSI
SIP/RTSP	RTP/RTCP	Sessão
TCP/UDP		Transporte
IP		Rede
Stanag 5066	802.11	Ligação
Stanag 4539		Física

Figura 3. Enquadramento dos protocolos no modelo de rede ISO/OSI.

CAPÍTULO 3

SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MULTIMÉDIA SOBRE HF

O sistema de comunicação multimédia sobre HF surgiu no âmbito de um projecto de investigação e desenvolvimento encomendado pela Marinha de Guerra Portuguesa ao Instituto de Telecomunicações (Pólo de Aveiro). O objectivo principal deste projecto foi criar um sistema de comunicações multimédia sobre a plataforma de rede baseada em canais HF, com largura de banda de 3 kHz, pertencentes à Marinha de Guerra Portuguesa.

Os requisitos do sistema de comunicações multimédia foram definidos pela criação duma sessão de mono-conferência, áudio e vídeo digital entre dois intervenientes, sobre o canal HF. Para atingir este objectivo, foi ainda imposto como requisito a utilização das normas STANAG 4539 [20] e STANAG 5066 [19], a nível da camada física e da camada de ligação, respectivamente. Acima da camada de ligação, foi requerido que a sessão de mono-conferência utilizasse protocolos de comunicações multimédia baseados em comunicações IP.

Os canais HF são conhecidos pelo seu longo alcance de comunicação, o que possibilita a existência de comunicações de longo curso. Estes canais são frequentemente usados, pela Marinha de Guerra Portuguesa, em comunicações de áudio analógico ou envio de mensagens textuais encriptadas. Por esta razão, a Marinha, possui uma infra-estrutura de antenas e *transceivers* capazes de comunicar entre a sua Estação de Radio Naval localizada em Algés (Lisboa) e os seus navios a navegarem em localizações marítimas distantes do globo. As comunicações sobre canais HF representam um custo baixo relativamente a

comunicações com tecnologias mais modernas, como é o caso do satélite, razão pela qual a sua utilização seja ainda universal.

A grande desvantagem das comunicações HF é o baixo débito de transmissão digital que se consegue alcançar por canal em uso. Esta desvantagem cria um verdadeiro desafio técnico quando se pretende usar um canal HF para estabelecer comunicações, em tempo real, de áudio e vídeo entre dois extremos do canal. A Figura 4 ilustra o sistema de comunicação multimédia projectado. A infra-estrutura HF da Marinha é constituída pelas antenas, *tranceivers* e *modems* que se podem visualizar na Figura 4. O *modem* de HF permite o envio de informação digital para o canal HF através duma porta série RS-232, tal como ilustrado na Figura 4.

Como já mencionado, o objectivo consistiu em utilizar a infra-estrutura HF da Marinha para comunicar entre dois clientes multimédia, localizados nos extremos do canal HF. No decorrer da especificação do projecto e por uma razão de conforto da pessoa envolvida na comunicação, decidiu-se que o cliente multimédia poderia estar localizado num espaço físico distante do *modem* HF. Esta decisão levou a optar-se por uma ligação de rede local entre o cliente multimédia e o elemento de rede que interage com o *modem* HF, designado por “HF Gateway”. Esta ligação de rede local permite que o cliente multimédia e o “HF Gateway” estejam localizados em salas distintas. A razão do conforto da pessoa envolvida na comunicação, está relacionado com o facto das salas de comunicações existentes na marinha serem extremamente ruidosas a nível sonoro. Este ruído deve-se às comunicações de áudio analógico que permanecem durante 24 horas por dia e 7 dias por semana sob escuta.

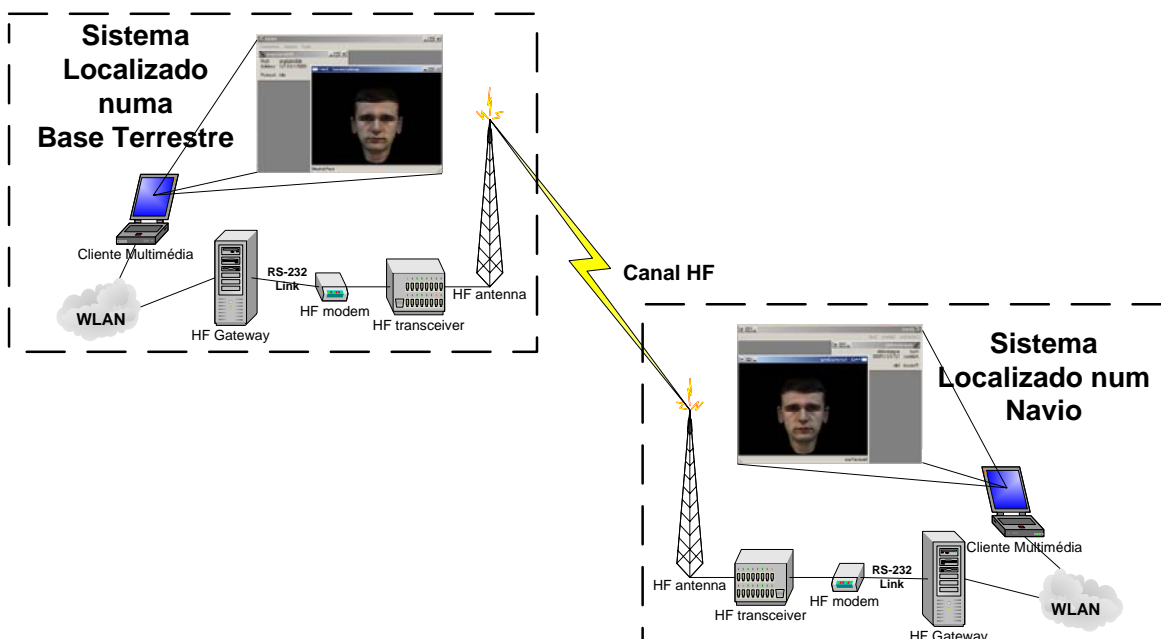


Figura 4. Sistema de comunicação multimédia sobre canais HF.

Os baixos débitos associados ao canal HF, maximizados por 12800 bps (no caso em que não existe codificação de canal), impõem o uso de conteúdos multimédia codificados a uma taxa muito baixa. Por essa razão, na camada de apresentação, o sistema proposto baseou-se em áudio [15] e parâmetros de face [16] especificados na norma MPEG-4. O codificador de áudio usado é o *Harmonic Vector eXcitation Coding* (HVXC) enquanto que para a síntese dos movimentos da face humana usaram-se *Face Animation Parameters* (FAPs). Esta dissertação não trata da codificação fonte, os artigos publicados em [29] e [30] abordam estes codificadores com maior nível de detalhe. Foram usados os *softwares* de referência do grupo MPEG (*Moving Picture Experts Group*) para a codificação das faces [17] e do áudio [18]. No âmbito do sistema de comunicação multimédia aqui apresentado efectuaram-se estudos de dimensionamento e perda de pacotes, condicionados pelas características de transmissão dos canais HF. Este estudo permitiu adicionar ao sistema de comunicações HF dois novos módulos: “HF Gateway” e cliente multimédia, como ilustrado na Figura 4.

3.1. Comunicação sobre canal HF

O recente e rápido crescimento das comunicações multimédia tem eficientemente permitido o fornecimento de diversos serviços, formatos e conteúdos sobre uma enorme variedade de redes digitais com o IP a agir como o protocolo integrador. O principal objectivo deste estudo é avaliar o desempenho numa rede sem fios baseada em comunicações HF para transportar serviços multimédia de acordo com a pilha protocolar UDP/IP. Para além de permitir comunicações civis/amadoras, as bandas de HF são também usadas para comunicações militares sem fios de longa distância, tal como já tinha sido mencionado. Por esta razão, a análise efectuada é baseada nas camadas física e de ligação normalizadas pela NATO, STANAG 4539 [20] e STANAG 5066 [19], respectivamente. Enquanto a primeira norma está implementada no *modem* a segunda foi parcialmente implementada em linguagem C++ pelo o autor desta dissertação. A largura de banda típica de transmissão é de 3 kHz resultando em débitos de transmissão num intervalo entre 75 e 12800 bps. Estes débitos de transmissão demasiado baixos, impõe por si só um desafio sério para as comunicações multimédia em tempo real. Este estudo discute combinações óptimas de decodificadores de canal, moduladores e tamanhos de pacotes de forma a obter o maior débito em função da razão sinal/ruído e das condições do canal HF.

Como anteriormente referido, o incentivo e justificação para esta investigação partiu do desejo da Marinha de desenvolver serviços multimédia, nomeadamente videoconferência sobre canais HF. O estudo apresentado neste documento faz uso dum simulador de canal radio HF [27] implementado, por um dos elementos da equipa de trabalho do projecto, de acordo com o modelo ionosférico HF de *Watterson* [28]. A partir do simulador geraram-se ficheiros de BER (*Bit Error Rate*) para três condições de canal segundo *Watterson*, os quais se usaram para determinar perda de pacote na camada de ligação STANAG 5066.

O diagrama de blocos representativo do sistema de comunicação usado nas simulações é ilustrado na Figura 5. Como neste trabalho se pretende determinar o desempenho da transmissão de pacotes em tempo real, o primeiro bloco representa a pilha RTP/UDP/IP [5], [13], [1] que encapsula os conteúdos multimédia. Os pacotes gerados pelo primeiro bloco passam depois pela camada de ligação do canal HF, STANAG 5066, responsável pela detecção de erros, ARQ (*Automatic Repeat Request*) e acesso ao meio.

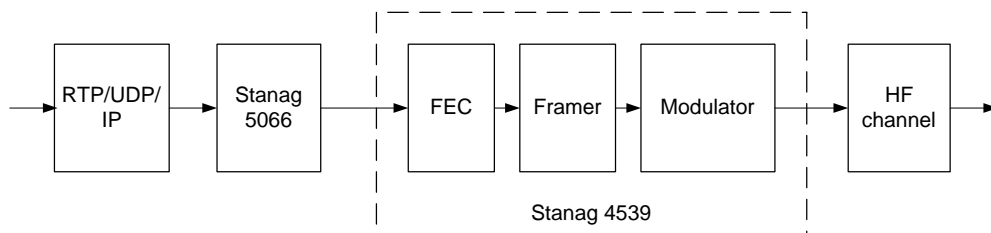


Figura 5. Sistema de comunicação HF.

3.2. Camada de ligação STANAG 5066

A STANAG 5066 [19] é a norma internacional pública da NATO para a camada de ligação das comunicações de dados sobre HF. Esta camada fornece um sistema geral, aberto e com interoperabilidade para comunicações sobre canal radio HF. Inclui as seguintes três subcamadas:

- *Subnetwork Interface Sublayer (SIS)*;
- *Channel Access Sublayer (CAS)*;
- *Data Transfer Sublayer (DTS)*.

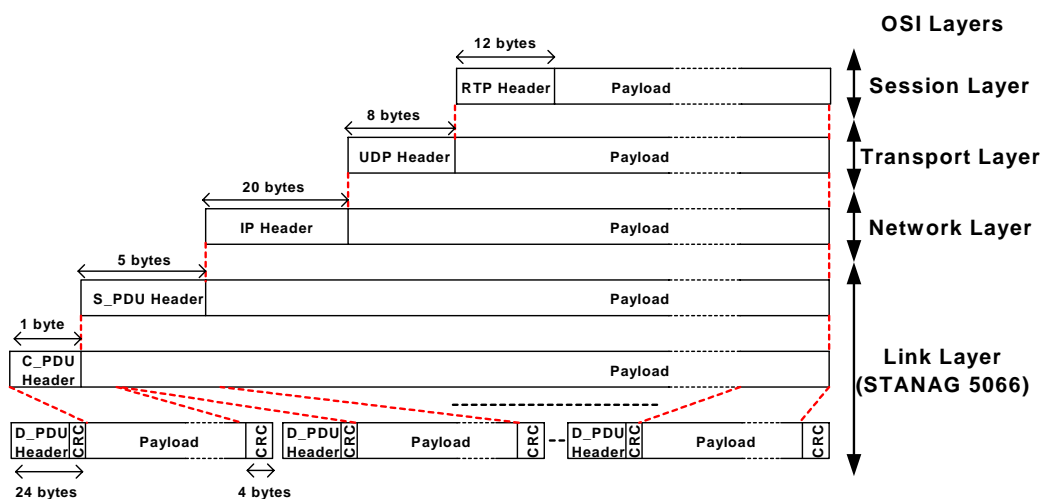


Figura 6. Encapsulamento segundo a pilha protocolar ISO/OSI.

A estrutura SIS é representada na Figura 6 com o cabeçalho S_PDU (*SIS Protocol Data Unit*). Os pacotes C_PDU e D_PDU são gerados pelas subcamadas CAS e DTS,

respectivamente. Estas três subcamadas fornecem os seguintes serviços de dados sobre canais HF arbitrários:

- Transferência de dados fidedigna ponto a ponto, usando um protocolo ARQ (*Automatic Repeat Request*);
- Transferência de dados não fidedigna ponto a ponto, *broadcast*, ou *multicast* sem o protocolo ARQ;
- Serviços regulares usando modos entrega ARQ e *non-ARQ*;
- Serviços expeditos usando modos entrega ARQ e *non-ARQ*;
- Serviços de início e fim da ligação para acessos de canal simples;
- Serviços de gestão para protocolos DRC (*Data Rate Change*).

A norma STANAG 5066 tem um mecanismo para verificar se existe canal físico estabelecido entre os extremos de forma a estabelecer uma comunicação de pacotes. Este mecanismo é especificado no Anexo B da norma (*Channel Access Sublayer*). Neste anexo são definidos seis tipos de C_PDUs, os quais são apresentados na Tabela 2. O tipo 0 de C_PDU tem um cabeçalho de um *byte* e é usado apenas para encapsular S_PDUs provenientes do SIS (especificado no Anexo A da norma). Os outros cinco tipos de C_PDUs são para estabelecer e terminar ligações físicas entre dois extremos remotos. Estes tipos de C_PDUs têm todos tamanho de um *byte* e são trocados entre dois *Channel Access Sublayers* para verificar o início ou o fim da ligação do canal HF. Obviamente, antes do primeiro C_PDU ser enviado, o canal físico deve ter sido previamente estabelecido por mecanismos tais como ALE (*Automatic Link Establishment*) executados pela camada física. Este mecanismo do *Channel Access Sublayer* é apenas útil para informar a camada de ligação da conectividade física, com o extremo que se pretende comunicar. Depois do extremo emissor enviar um pacote C_PDU de pedido (*Request*) irá entrar num estado de espera, por um período de tempo predefinido (*timeout*), pelo C_PDU de resposta (*Response*). Caso esta resposta não chegue no período de tempo, o emissor irá repetir o processo ou irá assumir que não existe canal físico estabelecido entre os dois extremos e irá informar as camadas superiores da situação.

Tabela 2. Tipos de C_PDU.

C_PDU NAME	Type Code
DATA C_PDU	TYPE 0
PHYSICAL LINK REQUEST	TYPE 1
PHYSICAL LINK ACCEPTED	TYPE 2
PHYSICAL LINK REJECTED	TYPE 3
PHYSICAL LINK BREAK	TYPE 4
PHYSICAL LINK BREAK CONFIRM	TYPE 5

A Figura 7 ilustra um pacote D_PDU tipo 7, especificado para serviço regular de entrega *non-ARQ*. Este pacote é iniciado por uma sequência conhecida de 2 bytes 0x90EB, seguido por um campo de 4 bits indicativo do tipo de D_PDU usado. Os dois campos seguintes, EOW (*Engineering Orderwire*) e EOT (*End of Transmission*), são especificados para funcionalidades de *Automatic Link Maintenance* (ALM) e transmissão em *half-duplex* (especificando o tempo que ainda resta para transmitir), respectivamente. Os tamanhos dos endereços e cabeçalhos são indicados nos dois campos de 3 e 5 bits, respectivamente. O campo dos endereços destino e fonte tem um tamanho máximo de 7 bytes. O cabeçalho específico do D_PDU tipo 7 é constituído por 9 bytes, transporta informação sobre o numero de bytes do C_PDU encapsulado e campos de suporte à fragmentação de C_PDUs. A verificação da correcção dos dados é feita pelos dois CRCs (*Cyclic Redundancy Checksums*) de 16 e 32 bits, respectivos à verificação do cabeçalho e do *payload* do pacote D_PDU. Os CRCs são calculados usando os seguintes polinómios:

$$x^{16} + x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^8 + x^6 + x^3 + 1$$

$$x^{32} + x^{27} + x^{25} + x^{23} + x^{21} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{13} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + x + 1$$

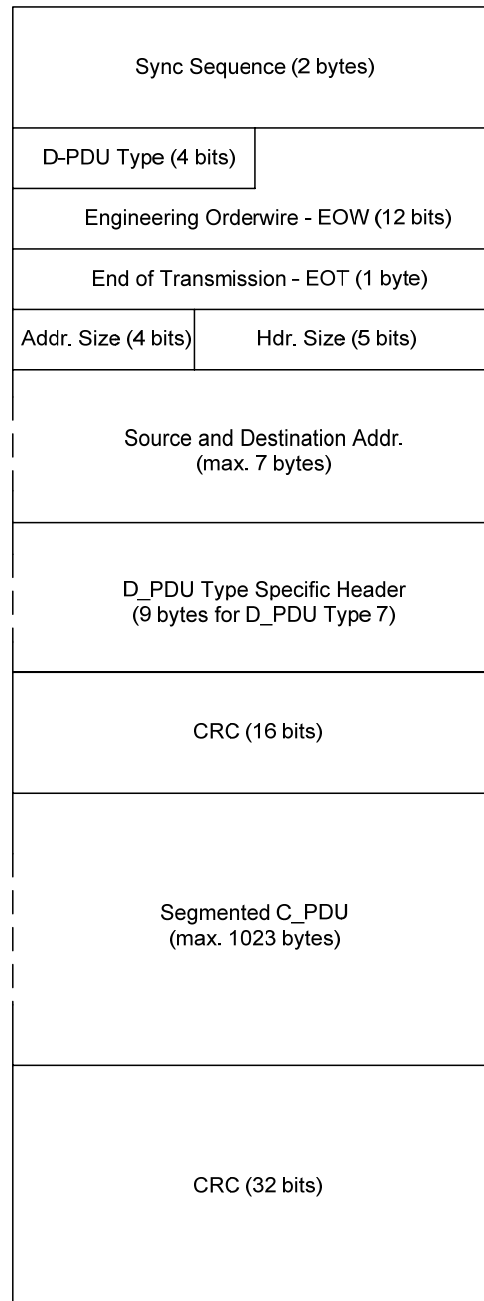


Figura 7. *Type 7 Non-ARQ D_PDU.*

3.3. ***Framing na camada física STANAG 4539***

Os pacotes D_PDU da STANAG 5066 são enviados para a camada física a qual é composta por codificação FEC (*Forward Error Correction*), *Framer* e blocos de modulação definidos pela STANAG 4539. Esta norma descreve a família de formas de onda HF que disponibiliza débitos de transmissão entre 75 a 9600 bps (com protecção de

canal) e 12800 bps (sem protecção de canal). Todas as formas de onda usam uma portadora única centrada em 1800 Hz com um débito de símbolo de 2400 símbolos por segundo. Os dados de entrada são submetidos à codificação de canal com uma taxa de codificação 3/4. Esta é obtida pela perfuração dum código convolucional com taxa de 1/2 e um comprimento de constrangimento $K=7$ para os polinómios geradores $g_1(x)=x^6+x^4+x^3+x+1$ e $g_2(x)=x^6+x^5+x^4+x^3+1$, passando posteriormente por um *interleaver* de bloco. Devido às restrições de atraso requerido pelo serviços multimédia de tempo real, o estudo efectuado não faz uso de *interleaver*. Mesmo o mais pequeno *interleaver* com atraso de 240 ms é inaceitável.

O bloco do *Framer* insere preâmbulos para facilitar a aquisição, a remoção do deslocamento do *Doppler* e o ajustamento da sincronização. Este preâmbulo também transporta informação sobre o débito dos dados e do *interleaver*. Os moduladores recomendados pela STANAG são QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM e 64QAM.

De seguida, descreve-se a estrutura da *Frame* normalizada pela STANAG 4539 e os respectivos preâmbulos, como é ilustrado na Figura 8.

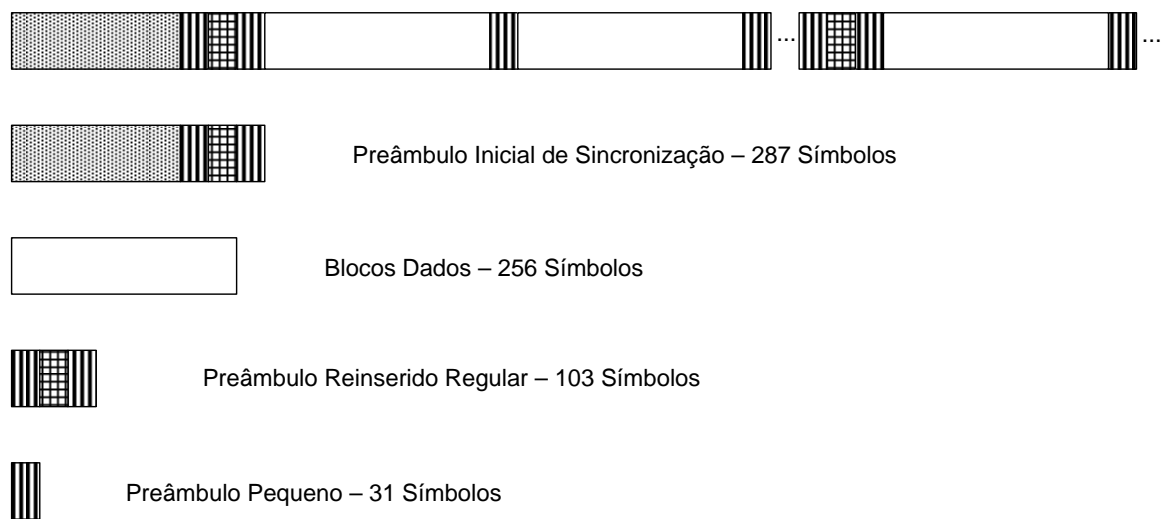


Figura 8. Estrutura da *Frame* para todas as formas de onda.

Um preâmbulo inicial de 287 símbolos é seguido por 72 *Frames* de dados, alternadas por sequências de símbolos conhecidos. Cada *Frame* de dados é constituída por 256 símbolos de dados, seguidos por um pequeno preâmbulo formado pela sequência de 31 símbolos conhecidos. A seguir às 72 *Frames* de dados, um conjunto de 72 símbolos do

preâmbulo inicial é reinserido. É de notar que o comprimento total deste segmento de dados conhecido é de 103 símbolos, resultado da soma dos 72 símbolos do preâmbulo reinserido com os 31 símbolos do preâmbulo pequeno que seguem os 256 símbolos do bloco de dados. Após o preâmbulo reinserido voltam a serem transmitidas 72 *Frames* de dados intervaladas por preâmbulos pequenos.

A um débito de 2400 símbolos por segundo, a transmissão de 72 *Frames* de dados seguidas pelas sequências de símbolos conhecidos, demora um intervalo de tempo de aproximadamente 8.64 segundos. Numa comunicação com duração temporal de 10 minutos serão transmitidos $N=69$ conjuntos seguidos de 72 *Frames* de dados seguidas pelas sequências de símbolos conhecidos. Tendo em conta a Estrutura da *Frame* apresentada, verifica-se que a razão entre os símbolos totais transmitidos pelos símbolos de dados efectivos transmitidos tende para o valor 1.125, quando N toma valores superiores 40. A expressão seguinte mostra o cálculo da razão de símbolo indicada, tendo em conta a transmissão do preâmbulo inicial de sincronização seguido pela transmissão de N sequências de 72 *Frames* de dados intervaladas pelas respectivas sequências de símbolos conhecidos.

$$\frac{287 + N \times (72 \times (256 + 31) + 72)}{N \times 72 \times 256} \cong 1.125, \quad \text{para } N > 40 \quad (1)$$

3.4. Análise do dimensionamento dos pacotes

Devido aos atrasos, em comunicações em tempo real, introduzidos pelo preenchimento do *payload* dos pacotes (no lado do emissor) e as restrições dos débitos impostas pela transmissão HF, estudou-se o tamanho ideal do pacote a ser usado. Os aspectos listados em seguida, foram a base deste estudo:

- Informação efectiva transmitida por pacote (razão do *payload* do pacote com o tamanho total deste);
- *Framer* definido pela norma STANAG 4539 [20] (inserção de símbolos de sincronização, aumentando os símbolos transmitidos pelo factor de 1.125 relativamente aos símbolos de dados);

- Modos de transmissão codificados (com FECs 1/2 e 3/4) e não codificado;
- As cinco modulações disponíveis (QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM e 64QAM);
- Atraso proveniente de aquisição do sinal de voz, e respectivo preenchimento do *payload* dos pacotes RTP com *frames* comprimidas de voz;
- Possível compressão dos cabeçalhos IP/UDP/RTP sobre o canal HF.

A Figura 6 ilustra o encapsulamento dos pacotes nas diferentes camadas definidas pelas normas RTP/UDP/IP/STANAG, bem como o tamanho usual dos cabeçalhos durante a transmissão dos pacotes RTP. O pacote C_PDU não será segmentado em mais de um pacote D_PDU como é sugerido pela figura, uma vez que os pacotes C_PDU têm tamanhos demasiado pequenos (no caso em estudo) para precisarem de ser segmentados.

Estudaram-se duas taxas de codificação de voz, correspondentes a 2 kbps e 4 kbps. Em cada pacote haverá um *overhead* dos cabeçalhos e CRCs de 74 bytes (na situação sem compressão dos cabeçalhos). Este valor é determinado pela soma de todos os cabeçalhos e CRCs do pacote RTP ao pacote D_PDU, tal como a próxima expressão mostra:

$$12(\text{RTPhdr}) + 8(\text{UDPhdr}) + 20(\text{IPhdr}) + 5(\text{S_PDUhdr}) + 1(\text{C_PDUhdr}) + 28(\text{D_PDUhdr \& CRCs}) = 74 \text{ bytes} \quad (2)$$

Tendo em conta este *overhead*, serão apresentados três casos de *Packet Overhead Ratio* para três tamanhos de *payload* do pacote RTP (25, 50 e 75 bytes).

Caso 1:

- Informação efectiva transmitida por pacote = 25 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = 25+74=99 bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = 74 / 99 = 0,7475.
- Considerando 2 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 100 ms.

Caso 2:

- Informação efectiva transmitida por pacote = 50 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = 50+74=124 bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = 74 / 124 = 0,5968.

- Considerando 2 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 200 ms.

Caso 3:

- Informação efectiva transmitida por pacote = 75 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = 75+74=149 bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = 74 / 149 = 0,4966.
- Considerando 2 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 300 ms.

A Tabela 3 ilustra os quarenta e cinco possíveis débitos de *payload* do RTP, RTP_PT, (dado pela expressão 3) no canal HF para os três casos acima estudados, cinco modulações e três FECs.

$$\text{RTP_PT} = \frac{\text{SymbolRate} \times \log_2 M \times \text{CodeRate} \times (1 - \text{PacketOverheadRatio})}{1.125} \quad (3)$$

onde M é o número de pontos na constelação e *SymbolRate* é igual a 2400 símbolos por segundo.

Tabela 3. Débitos em bps do payload de RTP.

	FEC	QPSK	8PSK	16QAM	32QAM	64QAM
Caso 1	1/2	539	808	1077	1347	1616
	3/4	808	1212	1616	2020	2424
	1	1077	1616	2155	2693	3232
Caso 2	1/2	860	1290	1720	2150	2580
	3/4	1290	1935	2580	3226	3871
	1	1720	2580	3441	4301	5161
Caso 3	1/2	1074	1611	2148	2685	3222
	3/4	1611	2416	3222	4027	4833
	1	2148	3222	4296	5370	6444

Em seguida, é apresentada a possibilidade de comprimir os cabeçalhos dos protocolos IP/UDP/RTP na ligação HF. Este tipo de compressão é especificado no RFC 2508 [14]. Esta norma, descreve um método de compressão dos cabeçalhos IP/UDP/RTP que reduz o *overhead* destes em ligações série de baixo débito, como é o caso do canal HF em comunicações *unicast*. Em muitos casos, os três cabeçalhos podem ser comprimidos até 2 a 4 *bytes*. Para um rápido entendimento deste método de compressão, o leitor pode consultar a subsecção 3.1 (com título “*The basic idea*”) do RFC (*Request For Comments*) referenciado.

Para os cálculos apresentados, assumiu-se que a compressão transforma quarenta *bytes* dos cabeçalhos IP/UDP/RTP em apenas quatro *bytes*. De seguida são apresentados três caso de *Packet Overhead Ratio* para três tamanhos de *payloads* de pacote RTP (25, 50 e 75 *bytes*) com compressão dos cabeçalhos IP/UDP/RTP sobre o canal HF.

Caso 4:

- Informação efectiva transmitida por pacote = 25 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = $25 + (74 - 36) = 63$ bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = $38 / 63 = 0,6032$.
- Considerando 2 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 100 ms.

Caso 5:

- Informação efectiva transmitida por pacote = 50 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = $50 + (74 - 36) = 88$ bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = $38 / 88 = 0,4318$.
- Considerando 2 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 200 ms.

Caso 6

- Informação efectiva transmitida por pacote = 75 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = $75 + (74 - 36) = 113$ bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = $38 / 113 = 0,3363$.
- Considerando 2 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 300 ms.

Nota: Os atrasos especificados são originados pela aquisição do sinal de voz e pelo respectivo preenchimento do *payload* do pacote RTP com *frames* comprimidas de voz.

A Tabela 4 ilustra os quarenta e cinco possíveis débitos de *payload* do RTP, RTP_PT, (dado pela expressão 2) no canal HF para os três casos acima estudados, cinco modulações e três FECs. Como se pode verificar pela tabela, com a compressão dos cabeçalhos são determinados cenários melhores de débitos de *payload* de pacote RTP sobre o canal HF.

Tabela 4. Débitos em bps do payload RTP com compressão IP/UDP/RTP.

	FEC	QPSK	8PSK	16QAM	32QAM	64QAM
Caso 4	1/2	847	1270	1693	2116	2540
	3/4	1270	1905	2540	3174	3809
	1	1693	2540	3386	4233	5079
Caso 5	1/2	1212	1818	2424	3030	3636
	3/4	1818	2727	3636	4546	5455
	1	2424	3636	4849	6061	7273
Caso 6	1/2	1416	2124	2832	3540	4248
	3/4	2124	3186	4248	5310	6372
	1	2832	4248	5664	7079	8495

Até esta fase da dissertação todos os cálculos basearam-se apenas no envio de áudio adquirido e comprimido no emissor. Assumindo agora o envio de parâmetros de codificação de FAPs a uma taxa de 2kbps e voz comprimida a uma taxa de 4 kbps. Os dados de FAPs e voz codificados são transmitidos dentro do mesmo *payload* de RTP.

Caso 7:

- Informação efectiva transmitida por pacote = 60 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = $60 + (74 - 36) = 98$ bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = $38 / 98 = 0,3878$.
- Considerando 4 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 80 ms.

Caso 8:

- Informação efectiva transmitida por pacote = 90 bytes.
- Informação total transmitida por pacote = $90 + (74 - 36) = 128$ bytes.
- *Packet Overhead Ratio* = $38 / 128 = 0,2969$.
- Considerando 4 kbps de compressão de voz resulta num atraso de 120 ms.

Nota: Os atrasos especificados são originados pela aquisição do sinal de voz e pelo respectivo preenchimento do *payload* do pacote RTP (considerando $2/3$ *payload* de codificação de voz e $1/3$ *payload* de codificação de FAPs).

A Tabela 5 ilustra os trinta possíveis débitos de *payload* do RTP, RTP_PT, (dado pela expressão 3) no canal HF para os dois casos acima estudados, cinco modulações e três FECs.

Tabela 5. Débitos em bps do payload RTP com compressão IP/UDP/RTP.

	FEC	QPSK	8PSK	16QAM	32QAM	64QAM
Caso 7	1/2	1306	1959	2612	3265	3918
	3/4	1959	2939	3918	4898	5877
	1	2612	3918	5224	6530	7836
Caso 8	1/2	1500	2250	3000	3750	4500
	3/4	2250	3375	4500	5625	6750
	1	3000	4500	6000	7500	9000

3.5. Metodologia de simulação de perda de pacotes

Nesta secção é apresentada a metodologia de simulação de envio dos pacotes pelo canal HF. Para as simulações, é assumida a compressão dos cabeçalhos IP/UDP/RTP sobre o canal HF.

O procedimento de simulação pode ser resumido nos seguintes passos:

- Modelação do canal de radio ionosférico [27] e geração de padrões de erro de bit (ficheiros de BER);
- Os pacotes são corrompidos pelos padrões de erro gerados anteriormente, resultando em padrões de pacotes corrompidos;
- Calculo de vários parâmetros de rede/canal tais como SNR, BER, eficiência do *overhead* dos cabeçalhos e perda de pacotes. Um pacote é considerado perdido quando o CRC do cabeçalho ou *payload* falha;
- Determinação do melhor tamanho de pacote, taxa de codificação FEC e modulação.

A Figura 9 mostra o modelo do canal HF usado para gerar os padrões de erro para diversas condições de canal. O modelo é composto por dois caminhos com desvanecimento em que o espectro em cada caminho corresponde à soma de duas funções Gaussianas na frequência, cada uma com um espalhamento de 2σ . S_I e S_Q são os símbolos fonte. O ruído de potência desejada é gerado pelo módulo de ruído Gaussiano aditivo (AWGN) como se mostra na Figura 9. A saída passa depois pelo sistema de recepção que por sua vez produz um fluxo de bits com uma determinada taxa de erros (BER). A razão sinal ruído é variada aumentando a potência do ruído AWGN, mantendo a potência do sinal igual a 1. Mais informação sobre a modelação do canal e a geração das sequências de bits pode ser obtida através das referências [20] e [27].

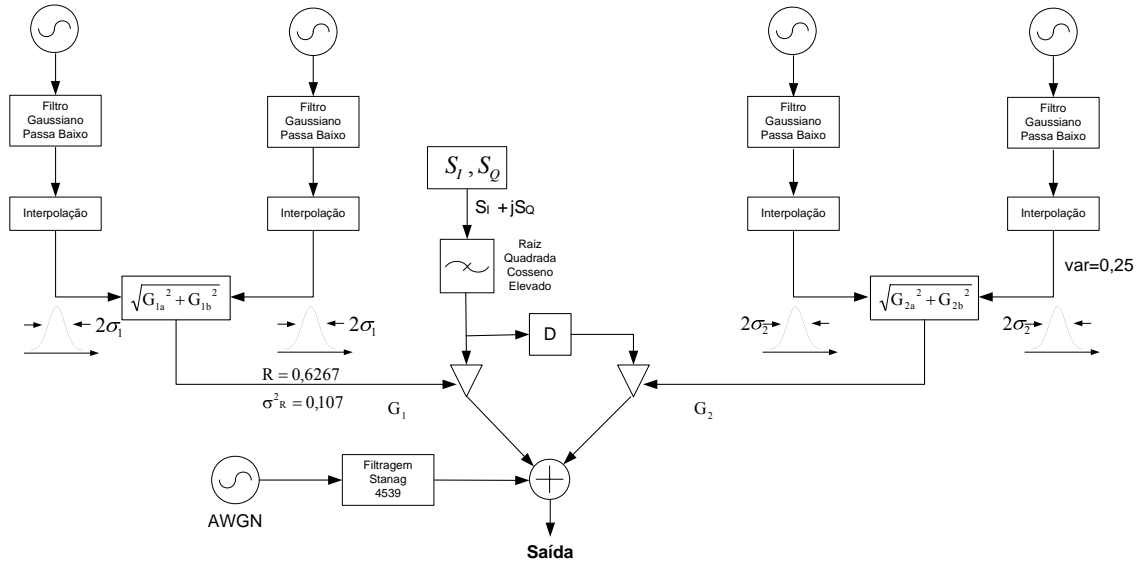


Figura 9. Diagrama do simulador do canal HF.

3.6. Técnica de encapsulamento e resultados obtidos

Assumiu-se que a voz e FAPs codificadas são multiplexadas e encapsuladas no mesmo pacote RTP. Este esquema de encapsulamento resulta em seis diferentes tamanhos de *payload* RTP, para atrasos menores ou iguais a 300 ms. A Tabela 6 apresenta para três atrasos e diferentes combinações de FAPs e voz encapsuladas no mesmo pacote RTP, oito possíveis casos de transmissão. As colunas da Tabela 6 FAPs e voz apresentam respectivamente a fracção de *bytes* codificados transportados no mesmo *payload* de pacote RTP. As FAPs e voz são ainda distinguidas por taxas de codificação iguais a 2 ou 4 kbps. A última coluna da tabela apresenta o débito fonte resultante da soma dos débitos individuais de FAPs e voz.

Tabela 6. Parâmetros de comunicação.

Atraso (ms)	FAPs		Voz		<i>Payload</i> RTP (<i>bytes</i>)	Débito fonte (bps)
	2 kbps	4 kbps	2 kbps	4 kbps		
100		50	25		75	6k
		50		50	100	8k
200	50		50		100	4k
	50			100	150	6k
		100	50		150	6k
		100		100	200	8k
300		150	75		225	6k
		150		150	300	8k

Repetindo os cálculos (à semelhança dos efectuados na secção anterior sobre encapsulamento de pacotes com compressão dos cabeçalhos IP/UDP/RTP) para novos tamanhos de *payloads* de pacote RTP, cinco modelações e cinco FECs, foram alcançados 150 débitos de transmissão de bit possíveis no canal HF que são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Débitos de transmissão em bps.

	Caso 1 (75 bytes)					Caso 2 (100 bytes)				
FEC	1/2	2/3	3/4	4/5	1	1/2	2/3	3/4	4/5	1
QPSK	1416	1888	2124	2265	2832	1546	2061	2319	2473	3092
8PSK	2124	2832	3186	3398	4248	2319	3092	3478	3710	4638
16QAM	2832	3776	4248	4531	5664	3092	4122	4638	4947	6184
32QAM	3540	4720	5310	5664	7080	3865	5153	5797	6184	7729
64QAM	4248	5664	6372	6796	8496	4638	6184	6957	7420	9275
	Caso 3 (150 bytes)					Caso 4 (200 bytes)				
FEC	1/2	2/3	3/4	4/5	1	1/2	2/3	3/4	4/5	1
QPSK	1702	2270	2553	2723	3404	1793	2390	2689	2868	3585
8PSK	2553	3404	3830	4085	5106	2689	3585	4034	4303	5378
16QAM	3404	4539	5106	5447	6809	3585	4781	5378	5737	7171
32QAM	4255	5674	6383	6809	8511	4482	5976	6723	7171	8964
64QAM	5106	6809	7660	8170	10213	5378	7171	8067	8605	10756
	Caso 5 (225 bytes)					Caso 6 (300 bytes)				
FEC	1/2	2/3	3/4	4/5	1	1/2	2/3	3/4	4/5	1
QPSK	1825	2433	2738	2920	3650	1893	2525	2840	3030	3787
8PSK	2738	3650	4106	4380	5475	2840	3787	4260	4544	5680
16QAM	3650	4867	5475	5840	7300	3787	5049	5680	6059	7574
32QAM	4563	6084	6844	7300	9125	4734	6312	7101	7574	9467
64QAM	5475	7300	8213	8760	10951	5680	7574	8521	9089	11361

Considerou-se um débito de transmissão fonte apresentado na coluna mais à direita da Tabela 6, com *payloads* gerados no lado do extremo emissor e com atraso não superior a 300 ms. Todas as possíveis combinações são indicadas pelas células mais escuras da Tabela 7. Com um atraso igual a 100 ms e um débito de transmissão fonte de 8 kbps (Tabela 6), apenas uma combinação é possível e está marcada a negrito na Tabela 7. Uma vez identificadas todas as combinações possíveis, deverá ser escolhido o parâmetro de

comunicação (taxa codificação de canal, modulador, tamanho de pacote) que origina a menor perda de pacote. Por isso, foram simulados diferentes condições do canal HF com SNR (*Signal Noise Ratio*) compreendido entre 0 e 45 dB. A simulação do canal HF resultou numa base de dados de ficheiros de BER (*Bit Error Rate*) nos quais o valor “0” representa a transmissão dum bit errado e o valor “1” representa a transmissão dum bit certo. Para as três condições de canal *good*, *moderate* e *poor* geraram-se trinta ficheiros de padrões de erro, com durações superiores à transmissão de 220 mil bits pelo canal HF. Os ficheiros gerados estão disponíveis no seguinte *site*: <http://www.av.it.pt/research/rmom/dtv/intconfs.html>.

Da Figura 10 à Figura 15 apresentam-se as percentagens de perda de pacote para condição de canal *good* [21], excluindo as combinações não permitidas na Tabela 7. O pacote é considerado perdido caso ocorra um erro a nível do D_PDU.

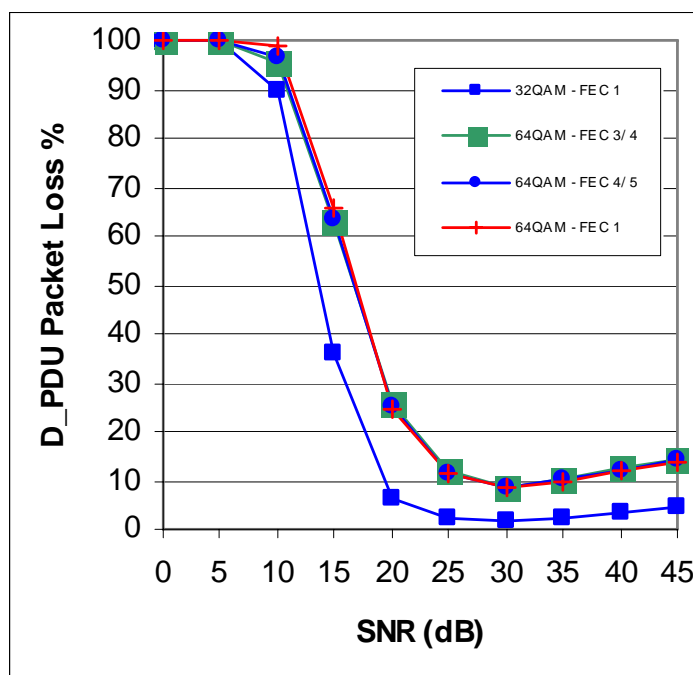


Figura 10. Percentagem de perda pacote com 75 bytes de *payload* do RTP.

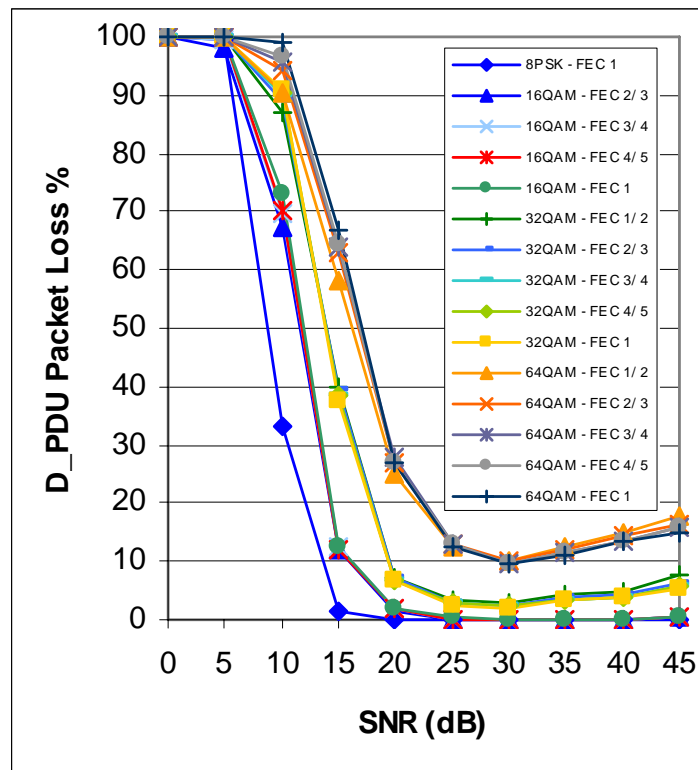


Figura 11. Percentagem de perda pacote com 100 *bytes* de *payload* do RTP.

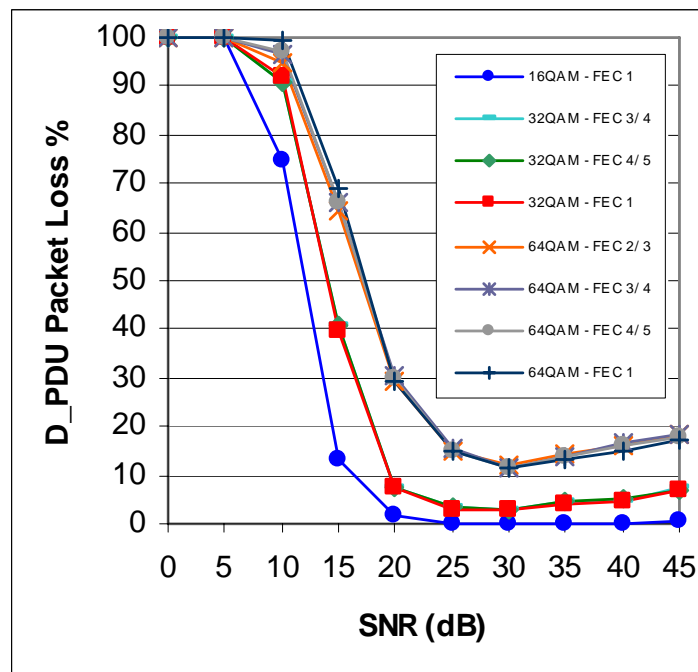


Figura 12. Percentagem de perda pacote com 150 *bytes* de *payload* do RTP.

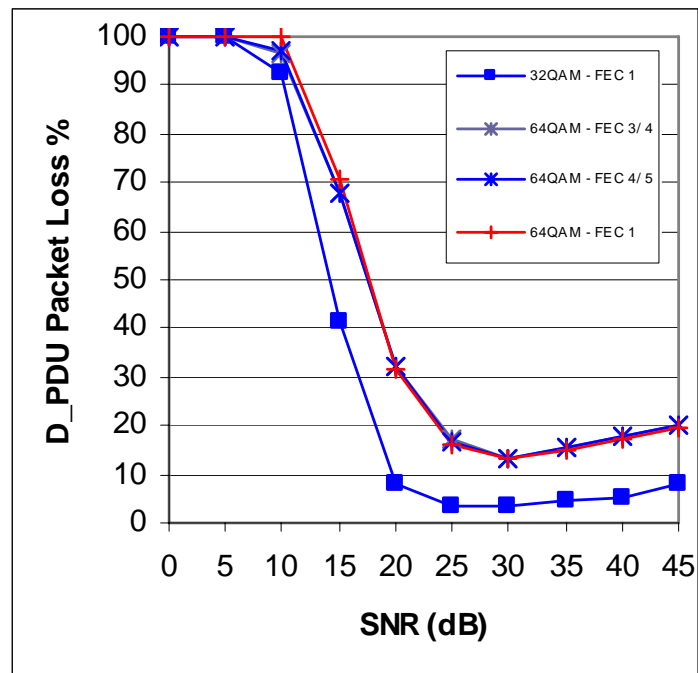


Figura 13. Percentagem de perda pacote com 200 *bytes* de *payload* do RTP.

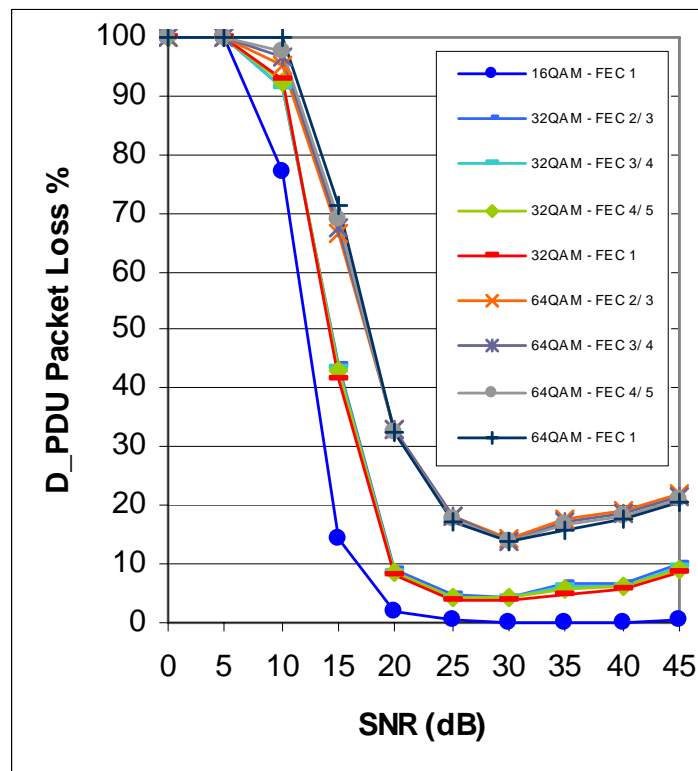


Figura 14. Percentagem de perda pacote com 225 *bytes* de *payload* do RTP.

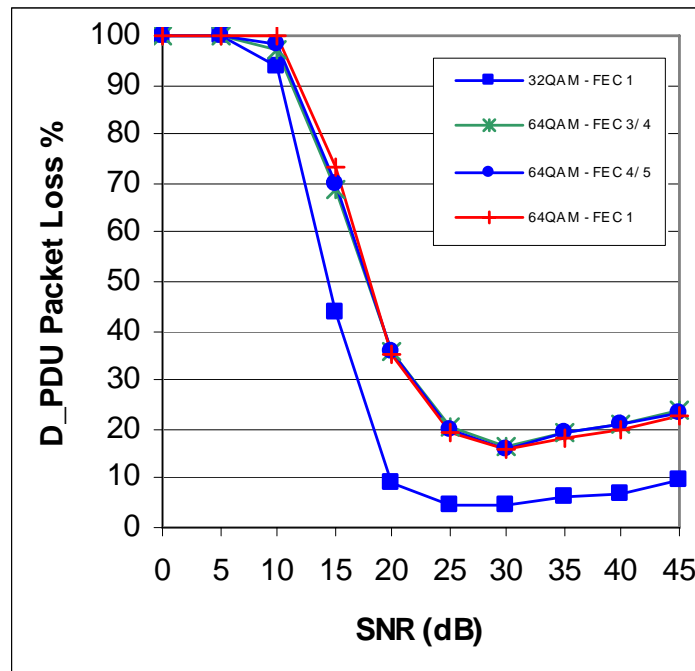


Figura 15. Percentagem de perda pacote com 300 *bytes* de *payload* do RTP.

Ao examinar as seis figuras anteriores verifica-se que as curvas possuem um mínimo em redor de SNR=30 dB. Acima deste valor a perda de pacote aumenta devido ao equalizador utilizado [27] no simulador do canal HF. Seleccionaram-se as curvas correspondentes às percentagens de perda de pacote mais baixas. As curvas seleccionadas são ilustradas na Figura 16. Como esperado, a menor percentagem de perda de pacotes D_PDU corresponde à constelação com o menor número de níveis. Na Figura 16, a diferença entre as curvas 8PSK-FEC 1 e 32QAM-FEC 1 (75 *bytes* de *payload*) com SNR=15 dB é por volta de 35%. No entanto, as constelações com menor número de níveis correspondem a um atraso maior de transmissão de pacote. Esta interpretação levou a medir o desempenho tendo em conta o atraso no extremo emissor, pois está-se perante uma comunicação em tempo real.

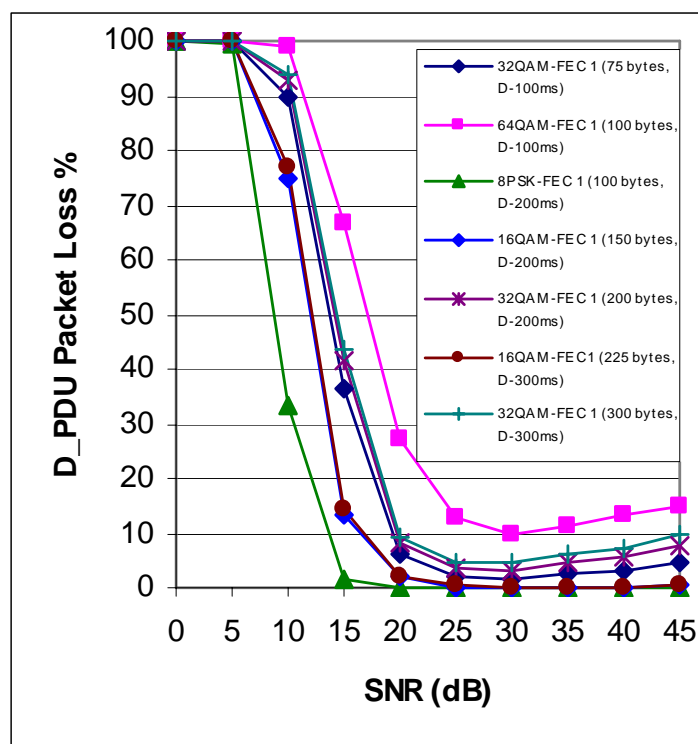


Figura 16. Selecção das curvas com menor perda pacote.

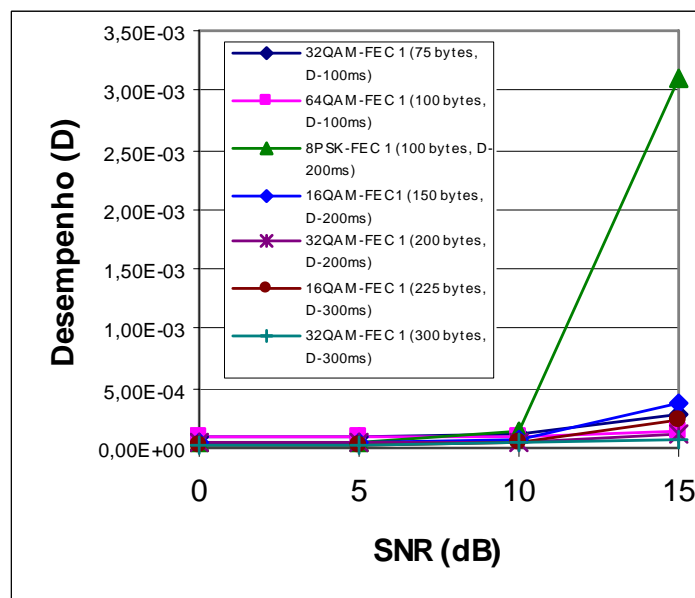


Figura 17. Curvas com melhor desempenho para SNR inferior a 15 dB.

Como o atraso também deve ser levado em conta, é definido um critério de medida de desempenho através da seguinte expressão,

$$D = \frac{1}{\text{Delay} \times \text{PacketLoss}}. \quad (4)$$

Aplicou-se a expressão de desempenho aos valores obtidos na Figura 16 para um valor de SNR inferior a 15 dB, tal como ilustrado na Figura 17. Como o desempenho aumenta significativamente acima de SNR=10 dB, são recomendados os seguintes parâmetros de transmissão: sem FEC, SNR maior que 10 dB e 8PSK. A utilização de FECs sem uso de *interleaver* não conduz a uma melhoria significativa da qualidade da comunicação, segundo as condições de atraso impostas. Por esta razão, uma solução passa pela diversidade na frequência, assunto que será discutido na próxima secção.

3.7. Diversidade com dois canais HF

Na sequência da possibilidade de usar dois canais HF para transmitir informação em cada sentido, estudou-se o impacto na percentagem de perda de pacotes do envio de redundância de pacote.

A solução de diversidade com dois canais HF, aqui proposta, é compatível com as normas STANAG, pois os mesmos dados são transmitidos em ambos os canais, isto é, o mesmo pacote é transmitido nos dois canais. No receptor, caso ambos os pacotes recebidos estejam corrompidos, o pacote é descartado e considerado perdido. Obviamente trata-se de um sistema com enorme redundância e por isso pouco prático em casos em que os débitos a transmitir sejam elevados. Para este estudo, assumiu-se que em ambos os canais a perda de pacote é descorrelacionada, tendo em consideração que a frequência de transmissão dos dois canais é suficientemente afastada. Para o estudo de diversidade aqui apresentado, escolheu-se apenas um tamanho de *payload* RTP, correspondente ao melhor resultado obtido na secção anterior, isto é, 100 bytes. As 6 figuras seguintes ilustram os resultados obtidos de perda de pacote para os cenários sem e com a solução de diversidade e em condições de canal *good*, *moderate* e *poor*. Este estudo foi publicado em [23] e [24].

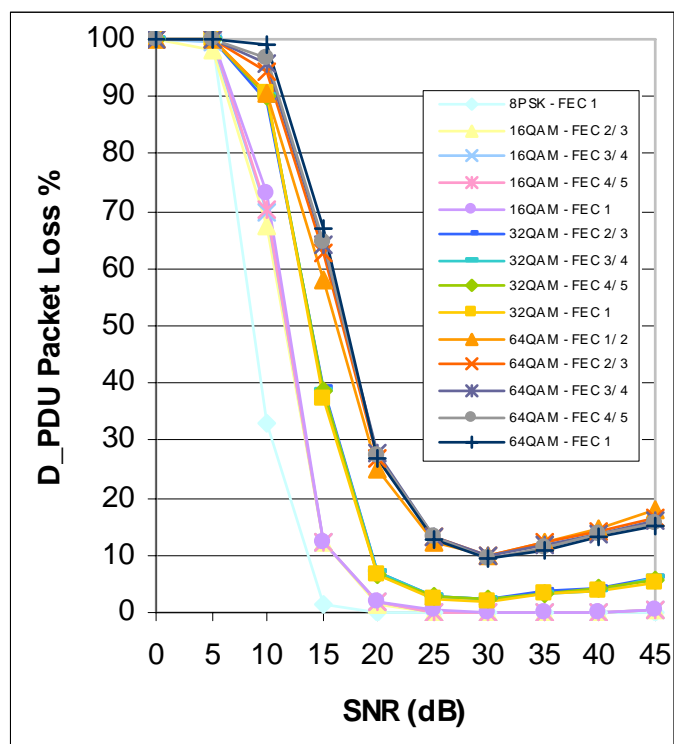


Figura 18. Percentagem perda pacote (condições canal *good* e sem diversidade).

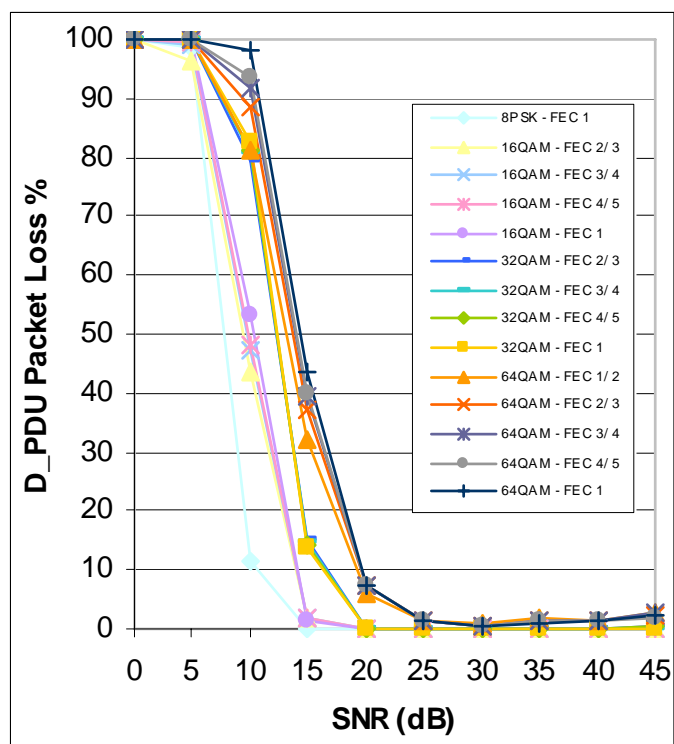


Figura 19. Percentagem perda pacote (condições canal *good* e com diversidade).

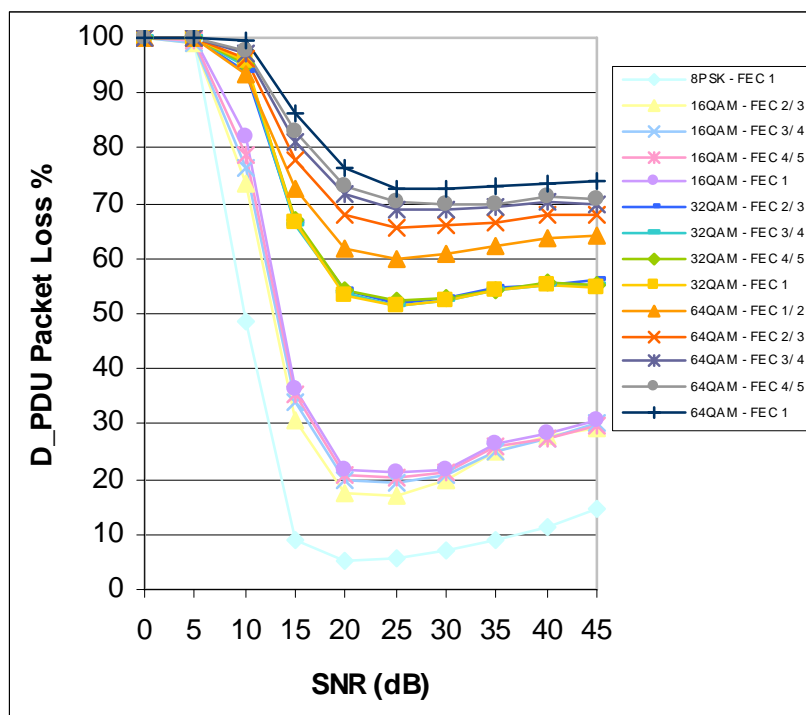


Figura 20. Percentagem perda pacote (condições canal *moderate* e sem diversidade).

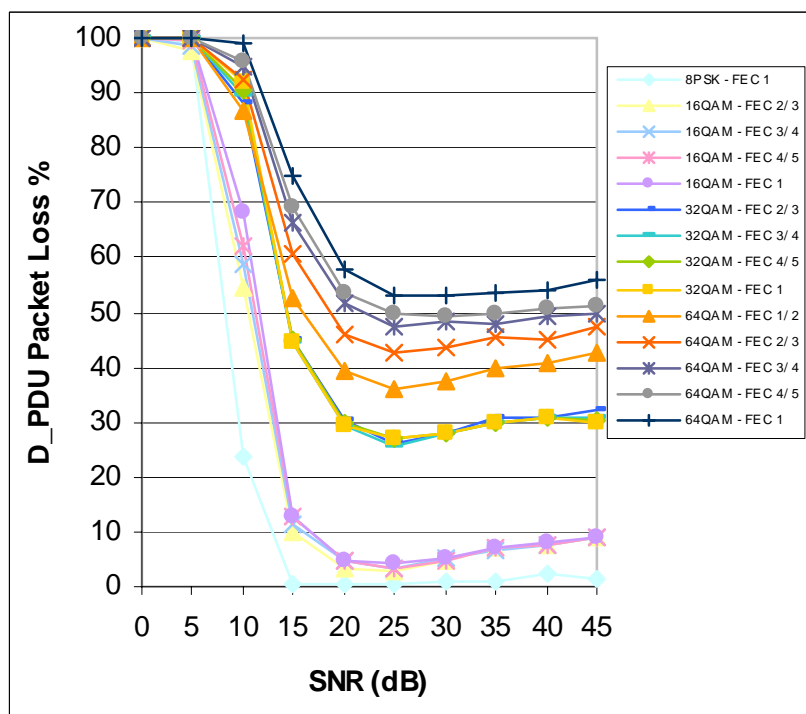


Figura 21. Percentagem perda pacote (condições canal *moderate* e com diversidade).

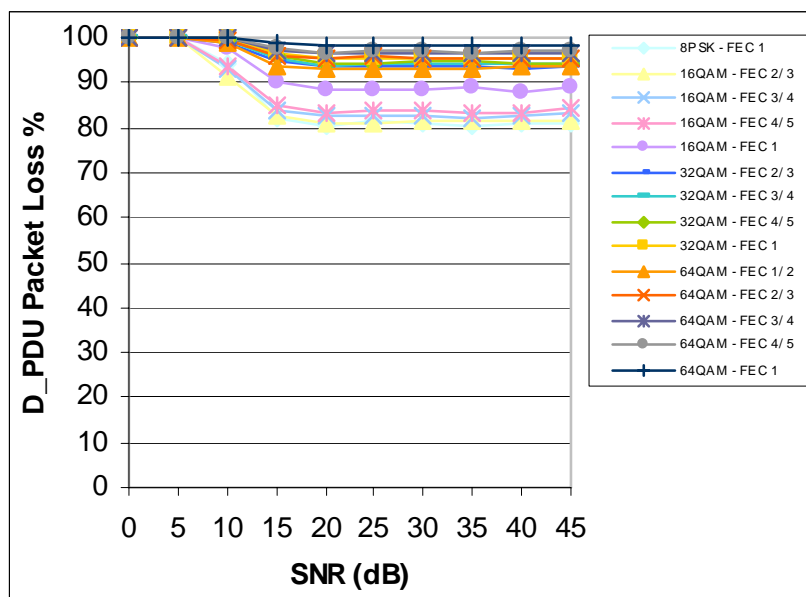


Figura 22. Percentagem perda pacote (condições canal *poor* e sem diversidade).

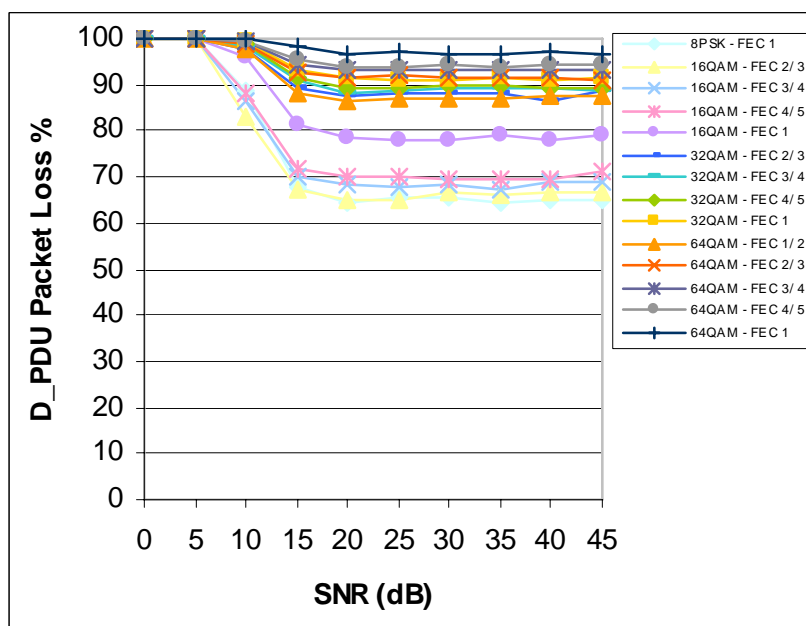


Figura 23. Percentagem perda pacote (condições canal *poor* e com diversidade).

Esta solução será sempre um compromisso entre a disponibilidade de canais HF existente na infra-estrutura e a qualidade da comunicação pretendida. Como se verifica pela Figura 22 e Figura 23, quando o canal se encontra em condições *poor*, a perda de pacote é sempre acima dos 60%, para todas as possibilidades de modelações e FECs. A

solução de diversidade diminui em média a percentagem de perda de pacote em 8,82% para as condições de canal *poor*. Embora a percentagem de perda de pacote continue a ser elevada mesmo com uso de diversidade, uma comunicação multimédia é inviabilizada nestas condições. No caso em que o canal se encontre em condições *moderate*, o resultado do uso de diversidade é bem mais significativo, diminuindo em média a percentagem de perda de pacote em 12,25%. Pode-se verificar pela Figura 21, para todas as curvas 8PSK e 16QAM e para SNR superior a 15 dB que a perda de pacote é sempre inferior a 15%, o que não se verifica no mesmo caso sem diversidade (Figura 20). A margem para melhorias médias com diversidade quando o canal se encontra em condições *good* é menor, embora se tenha medido ainda uma melhoria média de 5,14% relativamente às mesmas condições de canal e sem diversidade. Como se pode verificar pela Figura 19, para todas as curvas 8PSK, 16QAM e 32QAM e para SNR superior a 15 dB a perda de pacote é sempre inferior a 15%, o que representa uma melhoria significativa relativamente às mesmas condições de canal sem diversidade (Figura 18).

No artigo [55] estuda-se o desempenho do codificador de voz HVXC [15] da norma MPEG-4, ao transmitir voz codificada sobre o canal HF. Neste estudo avalia-se os parâmetros de codificação de voz do algoritmo HVXC identificando os mais significativos. Mostra-se ainda que o parâmetro mais significativo é a decisão Vozeada/Não Vozeada (V/UV – *Voiced/Unvoiced*) para uma razão Sinal/Ruído inferior a 6dB. Os parâmetros menos significativos são os relacionados com as *frames* Não Vozeadas. De forma a mostrar que a análise da sensibilidade aos erros é útil para determinar novos esquemas de recuperação rápida aos erros, é proposta uma técnica de diversidade de parâmetros que aumenta a qualidade da voz em cerca de 15.54%. Conclui-se que um esquema de recuperação rápida aos erros deve ter em conta as características do canal de rádio HF. Este artigo é um bom exemplo da importância do estudo do comportamento dos canais de comunicação e da forma como este conhecimento pode ajudar a minimizar os erros no receptor.

O capítulo seguinte apresenta o estudo de desempenho realizado para a WLAN, para mais uma vez se adquirir conhecimento sobre uma infra-estrutura de comunicação.

Capítulo 4

Sistema comunicações multimédia sobre WLAN

A mobilidade de sistemas computacionais pessoais (tais como *laptops* ou *handhelds*), com acesso de rede em espaços restritos, é hoje em dia uma necessidade comum. Esta necessidade é facilmente compreendida numa sociedade onde a informação é disponibilizada massivamente pela rede e onde o custo dos sistemas computacionais pessoais, móveis ou portáteis, tem vindo a decrescer com o respectivo aumento da procura. Entenda-se como espaço restrito uma área ocupada por uma empresa, instituição, zona residencial ou comercial. Para colmatar a necessidade da mobilidade descrita, surgiram as redes locais sem fios conhecidas globalmente pela sua designação anglo-saxónica: *Wireless Local Area Networks* (WLANs). As WLANs fornecem geralmente uma mobilidade num raio até 300 metros (em espaço aberto), centrada por um ponto de acesso que disponibiliza uma ligação de rede de banda larga sem fios.

As comunidades científicas, académica e empresarial têm vindo a trabalhar no processo de normalização de duas soluções para redes locais sem fios. A norma mais conhecida e utilizada é designada por 802.11 [26] (também conhecida por Wi-Fi – *Wireless Fidelity*). A responsabilidade de normalização é levada a cabo pelo IEEE. Um processo paralelo de normalização é feito pelo ITU-T, cuja solução é conhecida pela norma HiperLAN2 [51], [52]. A simplicidade associada à norma 802.11, levou à sua adopção massiva por parte dos construtores de elementos de rede. Este facto impulsionou as vendas e a descida dos custos dos produtos compatíveis com a norma e tornou-a na norma de eleição presente no mercado das redes locais sem fios.

No âmbito deste trabalho, é feito um estudo do comportamento da rede 802.11 a ser usada para comunicações multimédia.

A norma 802.11 descreve os dois níveis inferiores do modelo OSI (*Open System Interconnection*), especificando assim as camadas física e de ligação da rede no que respeita ao acesso ao meio. À semelhança de outras redes, usa a norma 802.2 como subcamada de abstracção para a camada de rede. O 802.11 é uma norma em constante evolução cujo aparecimento de novas características da rede são publicados em anexos conhecidos como 802.11x, onde a letra ‘x’ é substituída por uma letra minúscula do alfabeto comum, isto é, 802.11a [50], 802.11b [44] ou 802.11g [33]. A Figura 24 ilustra a pilha protocolar da norma 802.11.

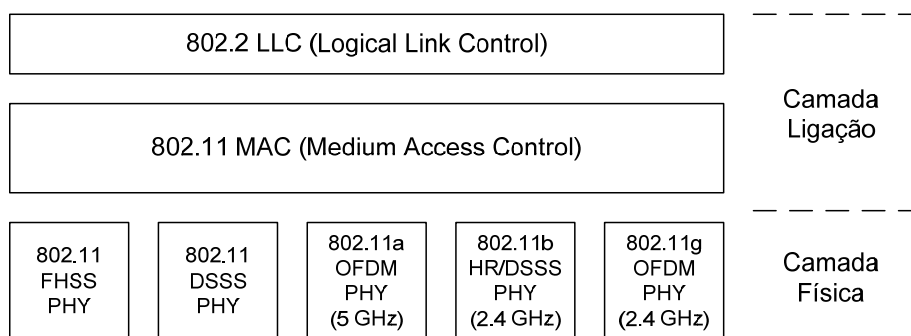


Figura 24. Pilha protocolar na norma 802.11.

A camada física permite uma diversidade de débitos de transmissão resultantes da conjugação entre diferentes modulações, taxas de codificação de canal e técnicas de multiplexagem especificadas pela norma e posteriores anexos (802.11a, 802.11b e 802.11g). A Tabela 8 ilustra um exemplo dos diferentes débitos de transmissão conseguidos com a multiplexagem OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Tabela 8. Débitos de transmissão conseguidas com a multiplexagem OFDM.

Débito transmissão Mbps	Modulação	Taxa codificação canal	Bits codificados por subportadora	Bits codificados por símbolo OFDM	Bits de dados por símbolo OFDM
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

No presente capítulo estuda-se o comportamento da rede IEEE 802.11 quando utilizada para comunicações multimédia. A metodologia seguida é baseada numa infraestrutura de rede real, ao contrário do capítulo anterior no qual estudou-se a rede HF seguindo uma metodologia baseada na simulação do canal HF. À semelhança do estudo executado para a rede HF, também na rede 802.11 o estudo é baseado na perda de pacotes. Neste caso as causas das perdas de pacotes são diferentes e provocadas maioritariamente pela sobrecarga de tráfego na rede, nos cenários estudados. A norma 802.11g foi seleccionada como a WLAN utilizada no estudo de perda de pacotes apresentado neste capítulo. Como se pode verificar na Tabela 9, esta WLAN opera na banda compreendida entre os 2.4 e os 2.4835 GHz com três canais não sobrepostos, cada um com uma largura de banda de 20 MHz.

Tabela 9. Bandas de frequência da rede 802.11

	802.11a	802.11b	802.11g
Banda de frequência	5.725 – 5.825 GHz	2.4 - 2.4835 GHz	2.4 - 2.4835 GHz
Largura de banda de canal	20MHz	20MHz	20MHz
Número de canais	12	3 (Não sobrepostos)	3 (Não sobrepostos)

4.1. Arquitectura de rede da IEEE 802.11 WLAN

A arquitectura de rede IEEE 802.11 é constituída por vários componentes que interagem para garantir uma rede local sem fios (WLAN) que suporte a mobilidade das estações de forma transparente para as camadas superiores. A topologia de rede mais simples da 802.11 é conhecida como *Basic Service Set* (BSS), onde duas ou mais estações comunicam entre si enquanto se encontram dentro do alcance radio e pertencem ao mesmo BSS. Um caso particular do BSS é o *Independent Basic Service Set* (IBSS), no qual as estações comunicam directamente entre si. O IBSS é geralmente conhecido como modo de comunicação *ad-hoc* e a topologia de rede usual é ilustrada pela Figura 25. Para uma estação se tornar membro duma infra-estrutura BSS deve estar associada ao BSS. A associação duma estação ao BSS é realizada de forma dinâmica, o que flexibiliza à estação ligar-se, desligar-se, entrar ou sair dentro do alcance radio do BSS.

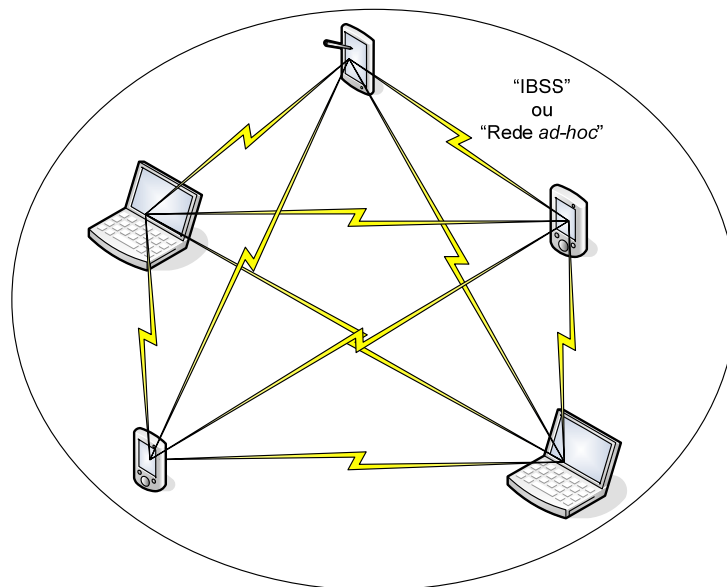


Figura 25. "IBSS" ou "Rede *ad-hoc*".

Dentro dum BSS poderá existir uma estação que providencia comunicações entre as restantes estações do BSS. Esta estação é designada por *Access Point* (AP) e como o seu nome sugere funciona como ponto de acesso dentro do BSS. Neste caso, as estações deixam de comunicar directamente entre si e passam a comunicar recorrendo ao AP. Este modo é geralmente conhecido como Infra-estrutura e é ilustrado na Figura 26.

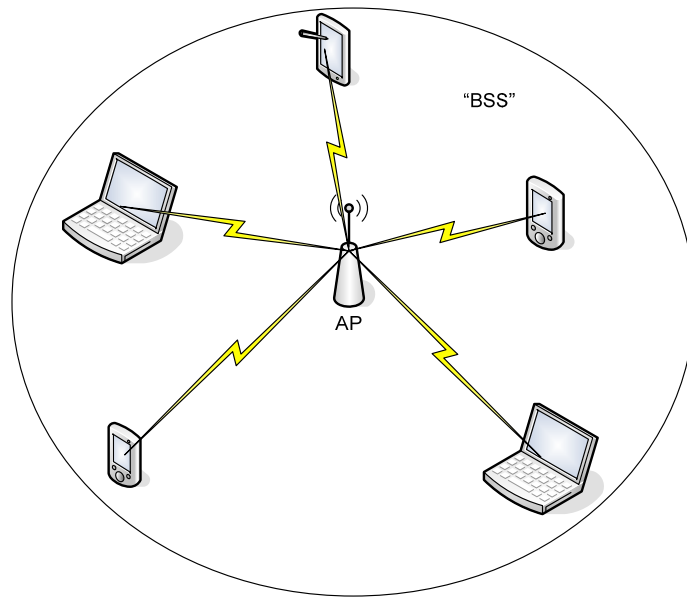


Figura 26. Modo de acesso Infra-estrutura.

Vários BSS podem comunicar entre si através dum *Distribution System* (DS), o qual interliga os vários AP de cada BSS. O DS pode ser constituído por outra tecnologia distinta do 802.11. Usualmente os DS são feitos recorrendo à tecnologia 802.3, vulgo *Ethernet*, operando os APs como *bridges* entre as tecnologias 802.3 [25] e 802.11 [26].

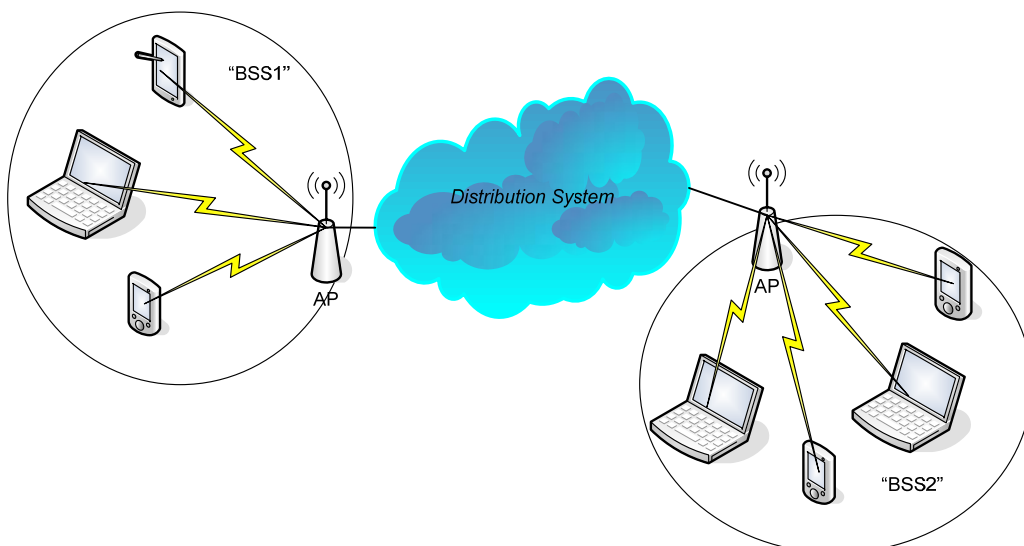


Figura 27. Ligação entre dois BSS através do DS.

A norma 802.11 define dois métodos de acesso ao meio, um com controlo distribuído (*Distributed Coordination Function* - DCF) e o outro com controlo centralizado (*Point Coordination Function* - PCF).

4.1.1 *Distributed Coordination Function*

O DCF é o método básico de acesso especificado pela norma, que se baseia num algoritmo de “escutar” a rede antes de enviar MSDUs (*MAC Service Data Units*) para esta. Este algoritmo é conhecido por CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). A ideia simplificada do algoritmo resume-se à verificação de ocupação da rede, por parte das estações, antes do envio de MSDUs para a rede. Como duas estações podem estar ao mesmo tempo à escuta, com objectivo de enviar MSDUs para a rede, poderá ocorrer uma colisão de MSDUs se ambas as estações enviarem os pacotes assim que detectem a rede desocupada. Para prevenir a ocorrência de colisões, é especificado um mecanismo de *Collision Avoidance*. Após a detecção da rede desocupada, ambas as estações irão executar um procedimento de contenção. Este procedimento consiste em continuar a monitorizar a ocupação da rede durante um tempo mínimo normalizado através da constante DIFS (*DCF Interframe Space*) seguido por um tempo aleatório, antes do envio dum MSDU para a rede. O tempo aleatório diminui a probabilidade de ambas as estações enviarem os seus MSDUs em simultâneo para a rede, evitando assim a colisão. A estação cujo tempo aleatório expire em primeiro lugar irá transmitir o seu MSDU para a rede. As estações cujo tempo aleatório não tenha expirado detecta a rede novamente ocupada, prevenindo o envio do MSDU para a rede.

Em modo de transmissão *unicast* a confirmação de recepção de todos os pacotes de dados é feita por pacotes de *Acknowledge* (ACK), enviados da estação que recebeu o pacote de dados para a estação que o enviou. Os pacotes de ACK são enviados expirado um tempo de espera normalizado pela constante SIFS (*Short Interframe Space*) e após o meio estar desocupado. A constante SIFS tem um valor inferior à constante DIFS, de forma a dar prioridade à transmissão dos pacotes de ACK sobre os pacotes de dados. Caso não seja recebido um pacote de ACK durante um período de *timeout*, depois do envio dum pacote de dados, ocorre a retransmissão do pacote de dados. O número de retransmissões dum pacote de dados é limitado, e o pacote é considerado perdido após ter sido alcançado o número máximo de retransmissões possíveis.

O tempo aleatório é gerado dentro dum intervalo majorado pelo valor da janela de contenção (*CW* - *Contention Window*). Na primeira transmissão de cada pacote, *CW* toma o valor mínimo especificado pela norma (*aCWmin*). Por cada retransmissão do mesmo pacote de dados, o valor de *CW* duplica até a um valor máximo especificado pela norma (*aCWmax*). Nas retransmissões seguintes ao *CW* ter atingido o valor máximo, *aCWmax*, *CW* permanece com o valor igual a *aCWmax*. Este procedimento aumenta a estabilidade do protocolo de acesso ao meio em condições de grande sobrecarga da rede.

A Figura 28 ilustra um exemplo de quatro estações a competirem pelo acesso ao meio, segundo o método DCF. Inicialmente a Estação A encontra-se a transmitir um pacote de dados para a Estação B, enquanto as Estações C e D passam a ter também pacotes para transmitir na rede. A Estação B recebe o pacote de dados da Estação A e envia o pacote de ACK depois de ter aguardado o tempo de SIFS. As Estações C e D continuam sem conseguir aceder ao meio, pois o tempo de DIFS que têm de esperar após o meio estar desocupado é superior ao tempo de SIFS, privilegiando assim a transmissão do pacote de ACK. Após terem detectado o meio desocupado e aguardado o tempo de DIFS, as Estações C e D competem pelo acesso ao meio, esperando pelo tempo aleatório gerado individualmente por cada Estação. Como a Estação D gerou um tempo aleatório inferior, transmite o seu pacote antes da Estação C. A Estação C cessa a sua contagem decrescente do tempo aleatório e transmite o seu pacote somente depois de detectar o meio desocupado durante o tempo de DIFS, mais o tempo aleatório restante, tal como é ilustrado na figura.

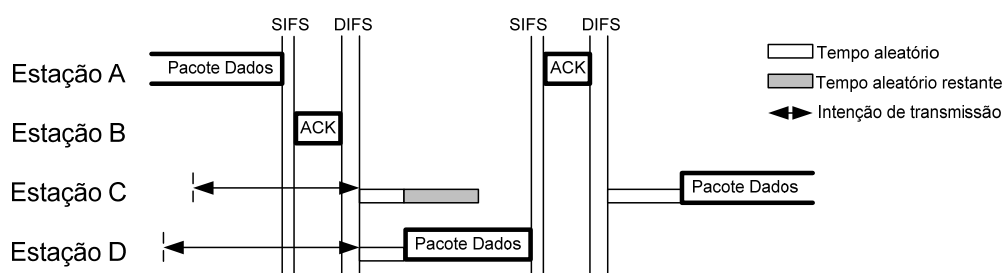


Figura 28. Procedimento de contenção de acesso ao meio.

O método de acesso CSMA pode sofrer do problema da estação escondida. Este problema surge quando uma terceira estação não consegue detectar a ocupação do meio, por estar fora do alcance rádio da Estação X que está a transmitir num dado momento.

Desta forma a terceira estação pode transmitir pacotes para rede ao mesmo tempo que a Estação X, devido à não detecção de ocupação da rede. Neste caso, as estações estão escondidas mutuamente causando interferência entre si. Este problema é minimizado pela troca de pacotes RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) entre as estações que procedem à permuta de informação. Antes de serem transmitidos pacotes de dados, as estações têm a opção de transmitir um pacote RTS, este é seguido pela transmissão dum pacote CTS por parte da estação que recebe os pacotes de dados. Os pacotes RTS e CTS incluem a informação do tempo que demoraram a transmitir os próximos pacotes de dados e os respectivos pacotes de ACK. Deste modo, as restantes estações ao receberem os pacotes RTS e CTS suspendem a competição pelo acesso ao meio durante o tempo definido nos pacotes RTS e CTS. Este tempo de suspensão é controlado por um *timer* em cada estação designado por NAV (*Network Allocation Vector*).

A Figura 29 ilustra um processo de duas estações a trocarem entre si pacotes RTS e CTS (Estações A e B). No exemplo da Figura 29 a Estação D encontra-se fora do alcance rádio da Estação A, pois apenas activa o NAV no momento em que a Estação B envia o pacote de CTS. Recorrendo mais uma vez à figura, verifica-se que os pacotes de RTS e CTS alertam, respectivamente, todas as estações no raio de alcance das estações emissora e receptora dos pacotes de dados, evitando assim a ocorrência de estações escondidas que causem interferência.

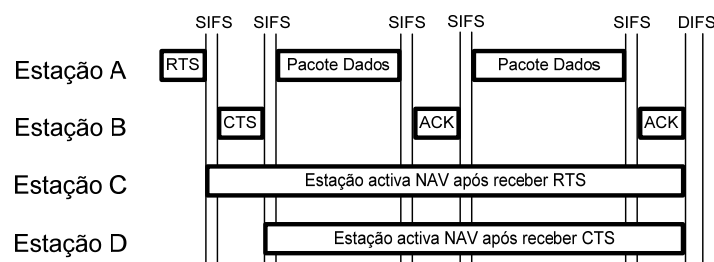


Figura 29. Troca pacotes RTS e CTS.

4.1.2 *Point Coordination Function*

A norma 802.11 especifica uma metodologia de acesso ao meio coordenada por uma estação central, designada por *Point Coordinator* (PC). Este método de acesso é designado por *Point Coordination Function* (PCF), onde o PC controla o acesso ao meio

das restantes estações determinando a próxima estação com direito a transmitir. O método de acesso PCF tem uma prioridade de transmissão superior ao DCF, devido às suas *frames* serem transmitidas ao fim dum período de tempo designado PIFS (*PCF Interframe Space*), inferior ao período DIFS e superior ao SIFS. Quando a rede suporta o modo de acesso ao meio PCF, o tempo é dividido em períodos repetidos, designados por *superframes*. Cada *superframe* é constituída por um período de acesso ao meio sem contenção seguido por um período de acesso ao meio com contenção. Estes dois períodos são designados por *Contention Free Period* (CFP) e *Contention Period* (CP), respectivamente. Durante o CFP as estações deixam de competir pelo acesso ao meio aguardando que o PC indique a sua vez de transmissão, enquanto que os períodos CP correspondem ao método básico de acesso ao meio da rede 802.11, designado por DCF. A norma especifica que o período CP tenha o comprimento mínimo correspondente à transmissão dum MSDU, segundo o método de acesso DCF.

Cada *superframe* é iniciada com uma *frame* designada por *beacon*, independentemente se o PCF está ou não activo. A *frame beacon* é uma *frame* de gestão que mantém a sincronização dos relógios locais das estações e distribui parâmetros relacionados com o protocolo. O PC, que está localizado tipicamente no AP, gera *frames* de *beacon* com um intervalo indicado nas próprias *frames*, o que permite que as restantes estações possam prever a emissão da próxima *frame* de *beacon*. Este intervalo é designado por *Time Beacon Transmission Time* (TBTT). A *frame* de *beacon* inicia o CFP, durante o qual as estações transmitem após serem apontadas pelo PC. O PC aponta as estações para transmitirem recorrendo às *frames* CF-Poll, como é ilustrado na Figura 30. O PC pode também ter *frames* de dados para distribuir às estações, aproveitando a indicação de transmissão duma estação para lhe enviar uma *frame* de dados, combinando uma *frame* de dados com uma *frame* CF-Poll. A estação indicada transmite após um período SIFS de ter recebido a *frame* CF-Poll. À semelhança das anteriores, as *frames* CF-ACK podem ser combinadas com *frames* de dados, como é sugerido na figura. Caso o PC indique uma estação, e esta não responda ao fim dum período igual a PIFS, o PC imediatamente indica outra estação para transmitir ou termina o CFP. Desta forma, a desocupação mínima do meio corresponde ao período de PIFS durante o CFP. O fim do CFP é indicado pelo PC ao enviar uma *frame* de CF-END para a rede.

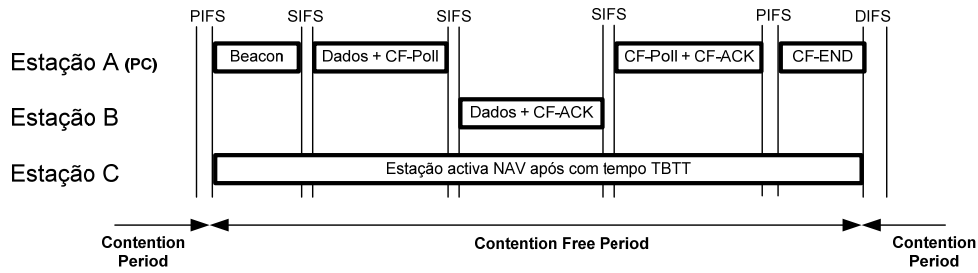


Figura 30. Transmissão *frame* CF-Poll.

4.2. Estudo e modelação da perda de pacotes

Nesta secção é apresentado o estudo dum novo modelo, para a rede 802.11g, baseado na perda e chegada de pacotes. Este novo modelo é comparado com o modelo *Gilbert-Elliot* (GE), onde é mostrado que o novo modelo é melhor num cenário particular mas bastante representativo da rede 802.11g. O modelo proposto tem dois parâmetros, um é em função do débito de pacotes fonte e o outro é quase constante.

4.2.1 Motivação do estudo

A modelação de sistemas de comunicação facilita a investigação de novas soluções para melhorar os mesmos sistemas. No contexto da convergência de redes e sua interoperabilidade, a modelação e simulação de sistemas de comunicação permite avaliar o desempenho das comunicações extremo a extremo assim como afinar parâmetros da rede e dos terminais. Neste contexto, a proximidade do modelo de rede em relação ao comportamento real desta, é de elevado grau de importância. Qualquer rede é usualmente caracterizada estatisticamente por vários parâmetros. Este capítulo propõe um modelo estatístico para o número consecutivo de pacotes chegados e perdidos, com um grau de simplicidade idêntico ao modelo matemático GE [31], [32], mas com maior precisão, pelo menos para o cenário estudado com a rede IEEE 802.11g [33].

O modelo GE tem sido extensivamente usado para o projecto e desenho de sistemas de comunicação. Em [34]-[36], códigos de canal foram avaliados na presença dum canal GE. Gnavi [37] desenhou a optimização de alguns parâmetros de codificação para o algoritmo H.264 (H.26L) [38]. Foi usado o modelo GE para determinar a selecção desses parâmetros de codificação. Mais recentemente, no caso de transmissão de imagens,

Grangetto [39] também resolveu o problema de alocação de taxas de códigos e demonstrou a solução empregando SPIHT [40] e JPEG2000 [41] como codificadores fonte e o GE como o modelo de rede. Embora muito utilizado para o estudo de sistemas de comunicação aos níveis das camadas de ligação, transporte e aplicação, o modelo GE tem sido apontado como pouco exacto em [42] e [43]. Em [42], uma aproximação teórica e simulações computacionais mostraram a necessidade de estender o número de estados de Markov para mais de dois estados, de forma a poder caracterizar o desvanecimento de canal adequadamente. Os autores em [43] apontam que o modelo GE é uma má aproximação à rede 802.11b [44] devido à existência de comprimentos elevados de perda e chegada de pacotes consecutivos nas distribuições características. O mesmo fenómeno é observado nos testes efectuados para este estudo relativamente ao IEEE 802.11g [33]. Em [43] são mostram-se as vantagens dos mapas caóticos e modelos semi-Markov. No entanto, estes modelos são mais complexos do que o proposto, que tem uma simplicidade semelhante ao GE. O modelo estudado supera o GE mesmo em situações onde os comprimentos dos consecutivos pacotes chegados ou perdidos são pequenos. Durante a evolução deste estudo publicaram-se os seguintes artigos [45]-[47].

4.2.2 Modelo GE

A transmissão de pacotes, em muitas das redes reais, sofre de perda pacotes consecutivos (tecnicamente designado por *error bursts*) separados pela chegada de pacotes correctos consecutivos (tecnicamente designado por *error free gaps* ou *runs*). Numa rede de comunicações sem garantia de qualidade de serviço, características como o desvanecimento profundo de canal e *overflow* de memória são as causas principais dos *error bursts* e *runs* de pacotes. Apesar dos sistemas de comunicação poderem usar técnicas de baralhamento (*interleaving*) para espalhar os erros, os decodificadores de canal podem introduzir erros de símbolos consecutivos (pacotes consecutivos) quando o número de erros é maior que a capacidade de correcção do decodificador. Um modelo com efeito de memória resultante dos erros consecutivos foi sugerido por Gilbert [31] e Elliot [32]. É um modelo com dois estados de Markov designados por estado *good* (G) e estado *bad* (B), tal como é ilustrado na Figura 31.

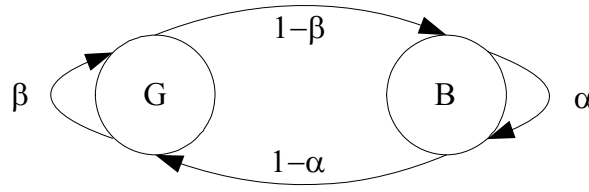


Figura 31. Modelo *Gilbert-Elliot*.

À chegada de cada pacote, o canal muda para um novo estado com probabilidades de transição do estado G para o estado B de $1-\beta$ e do estado B para o estado G igual a $1-\alpha$. Assuma-se as variáveis aleatórias X e Y como sendo o comprimento de pacotes consecutivos perdidos e chegados, respectivamente. Assim, a partir do modelo GE, as funções probabilidade de X e Y são geométricas e dadas por [45]:

$$P[X=n]=\alpha^{n-1}(1-\alpha) \quad (5)$$

$$P[Y=k]=\beta^{k-1}(1-\beta), \quad (6)$$

com $n, k \in \{1,2,\dots\}$. Os valores esperados de X e Y são dados pelas seguintes expressões:

$$E[X]=1/(1-\alpha), \quad (7)$$

$$E[Y]=1/(1-\beta). \quad (8)$$

De (7) e (8), a perda de pacotes ($PL - Packet Loss$) é expressa por

$$PL = \frac{E[X]}{E[X]+E[Y]} = \frac{1-\beta}{2-\alpha-\beta}, \quad (9)$$

que é igual à probabilidade de estar no estado B na situação estacionária.

4.2.3 Modelo perda de pacote proposto

Tendo em conta que a camada de transporte irá encapsular o tráfego multimédia de tempo real, é proposto modelar o comprimento de consecutivos pacotes RTP [5] que

chegam e são perdidos. Os pacotes RTP são transmitidos sobre a pilha protocolar UDP/IP/802.11g. Para alcançar o objectivo proposto, efectuou-se o teste de Qui-Quadrado *goodness-of-fit* das distribuições geométrica (modelo GE) e LSD (*Logarithmic Series Distribution* para o modelo proposto) com uma série de dados experimentais. A LSD foi seleccionada após o teste de várias distribuições conhecidas, as quais não se aproximavam da distribuição dos dados experimentais.

Seja X o comprimento de consecutivos pacotes RTP perdidos. Supondo que X é uma variável aleatória com uma função probabilidade expressa segundo a distribuição LSD,

$$P[X = n] = p_{n,\theta} = \frac{k\theta^n}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

onde θ é o parâmetro da distribuição e

$$k = -\frac{1}{\ln(1-\theta)}. \quad (11)$$

A média e a variância de X em (10) são, respectivamente, dadas por

$$E[X] = \frac{k\theta}{(1-\theta)}, \quad (12)$$

$$V[X] = \frac{k\theta(1-k\theta)}{(1-\theta)^2}. \quad (13)$$

Como houve necessidade de estimar θ a partir dos dados observados, determinou-se o MLE (*Maximum Likelihood Estimation*) de θ , isto é $\hat{\theta}$. O MLE é dado pela maximização da seguinte expressão:

$$L = \prod_{i=1}^N p_{n_i; \hat{\theta}}, \quad (14)$$

onde $n_i, i=1,2,\dots, N$ é o conjunto das observações. Substituindo (10) em (14), obtêm-se

$$L = \prod_{i=1}^N \frac{k \hat{\theta}^{n_i}}{n_i} = \frac{k^N \hat{\theta}^{\sum_{i=1}^N n_i}}{\prod_{i=1}^N n_i} . \quad (15)$$

Aplicando o logaritmo natural a ambos os membros da expressão anterior, obtém-se

$$\Lambda = \ln(L) = N \ln(k) + \sum_{i=1}^N n_i \ln(\hat{\theta}) - \ln\left(\prod_{i=1}^N n_i\right) . \quad (16)$$

Por uma questão de simplicidade, substitua-se os termos $N \ln(k)$, $\sum_{i=1}^N n_i \ln(\hat{\theta})$ e $-\ln\left(\prod_{i=1}^N n_i\right)$ por f_1 , f_2 e f_3 , respectivamente, isto é

$$\Lambda = \ln(L) = f_1(k) + f_2(n, \hat{\theta}) - f_3(n) . \quad (17)$$

Calculando a derivada parcial de Λ em relação a $\hat{\theta}$, obtém-se

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \hat{\theta}} = \frac{\partial f_1(k)}{\partial \hat{\theta}} + \frac{\partial f_2(n, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} - \frac{\partial f_3(n)}{\partial \hat{\theta}} \quad (18)$$

onde,

$$\frac{\partial f_1(k)}{\partial \hat{\theta}} = \frac{\partial f_1(k)}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \hat{\theta}} = \frac{N}{k} \times \frac{-1}{(1-\hat{\theta}) \ln^2(1-\hat{\theta})} = -\frac{Nk}{(1-\hat{\theta})} , \quad (19)$$

$$\frac{\partial f_2(n, \hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} = \frac{1}{\hat{\theta}} \sum_{i=1}^N n_i , \quad (20)$$

$$\frac{\partial f_3(n)}{\partial \hat{\theta}} = 0. \quad (21)$$

Considerando (18) igual a zero,

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \hat{\theta}} = -\frac{Nk}{(1-\hat{\theta})} + \frac{1}{\hat{\theta}} \sum_{i=1}^N n_i = 0 \quad (22)$$

e resolvendo a equação (22), obtêm-se

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i = \frac{k\hat{\theta}}{(1-\hat{\theta})}, \quad (23)$$

onde N é o número total de observações. Analisando a expressão (23) verifica-se que o MLE de θ é determinado usando a expressão da média (12) da variável aleatória X. O modelo final é descrito por duas funções probabilidade LSD, uma para os comprimentos de sucessivos pacotes perdidos e outra para os comprimentos de sucessivos pacotes chegados, ou seja, $P[X]$ e $P[Y]$, respectivamente. A equação (23) será então usada para encontrar uma estimativa de θ a partir dos dados observados da sequência de pacotes perdidos e chegados. Na secção 4.2.5 pode verificar-se que não existe correlação cruzada significativa entre X e Y, razão pela qual assume-se que X e Y são variáveis aleatórias independentes.

4.2.4 Plataforma de teste e resultados

Após a recolha de medidas de campo, os dados foram analisados estatisticamente. A análise foi feita em separado para comprimentos de consecutivos pacotes perdidos (X) e comprimentos de consecutivos pacotes chegados (Y). Estimou-se o parâmetro da distribuição $\hat{\theta}$ pelo cálculo da média das observações e substituindo (11) e em (23). Tanto quanto é conhecido até à data deste trabalho, não existia nenhum teste de referência para o 802.11g publicado na literatura. No entanto, executaram-se vários cenários de testes de forma a estudar o comportamento da rede, baseados nas dimensões do laboratório.

Nesta subsecção são descritos os cenários usados nas experiências executadas. Para estas medidas, considerou-se o envio de pacotes RTP/UDP/IP sobre a rede 802.11g

WLAN, devido ao interesse em estudar o comportamento desta rede para comunicações multimídia. Não se usou qualquer *payload* específico de RTP, sendo este preenchido com *bytes* aleatórios. Os pacotes errados são descartados abaixo do nível do UDP e a perda de pacotes foi monitorizada pela verificação dos números de sequência dos pacotes RTP recebidos.

Inicialmente, escolheram-se três tamanhos de *payload* para os pacotes RTP. Dois deles, com tamanhos de *payload* 50 e 200 *bytes*, os quais estão relacionados com duas taxas de codificação comuns de áudio, 4 kbps-10 pacotes/s (R1) e 13.3 kbps-8.33 pacotes/s (R2), respectivamente. O terceiro tamanho de *payload*, com 160 *bytes*, está relacionado com codificação de vídeo a 256 kbps-200 pacotes/s (R3). Na secção 4.2.7 são apresentados outros débitos de pacotes.

Foram testados sete cenários, referidos na Tabela 10, com duas estações, Sta1 e Sta2, a intercomunicarem pelo AP. Nos cenários S1x, apenas um débito de transmissão baixo (áudio) é trocado entre as estações. Ambas as estações debitam para a outra com os débitos R1 (S11) ou R2 (S12). Nos cenários S21, ambas as estações debitam uma para a outra vídeo com débito R3. No cenário S31, Sta1 debita áudio para Sta2 com o débito R1 e recebe vídeo da Sta2 com débito R3. Nos cenários S4x, ambas as estações debitam áudio mais vídeo para a outra estação. Particularmente, no cenário S41, a estação Sta1 debita áudio e vídeo com débitos R1 e R3, respectivamente. Em todos os cenários, os pacotes são enviados para a rede com um débito constante.

Tabela 10. Cenários de teste. Débitos de transmissão usados.

Cenários	Estação 1	Estação 2
S11	R1	R1
S12	R2	R2
S21	R3	R3
S31	R1	R3
S32	R2	R3
S41	R1+R3	R1+R3
S42	R2+R3	R2+R3

Todos os cenários foram implementados em modo infra-estrutura [26] como ilustrado na Figura 32 onde a estação 1 (Sta1), via o AP, recebe dados enviados pela estação 2 (Sta2) e vice versa. Significativos comprimentos de pacotes consecutivos perdidos são apenas alcançados caso o tráfego na rede seja acima dos 10 Mbps. Por esta razão, em todos os cenários, as estações Sta3 e Sta4 trocam dados entre si, através da infra-estrutura de rede sem fios, cada estação a envia um débito fonte de 6.1 Mbps (*payload* dos pacotes RTP). Estas duas estações carregam a rede, aumentando o tráfego fonte e simulando dezenas de outras estações a interferir no decorrer da comunicação.

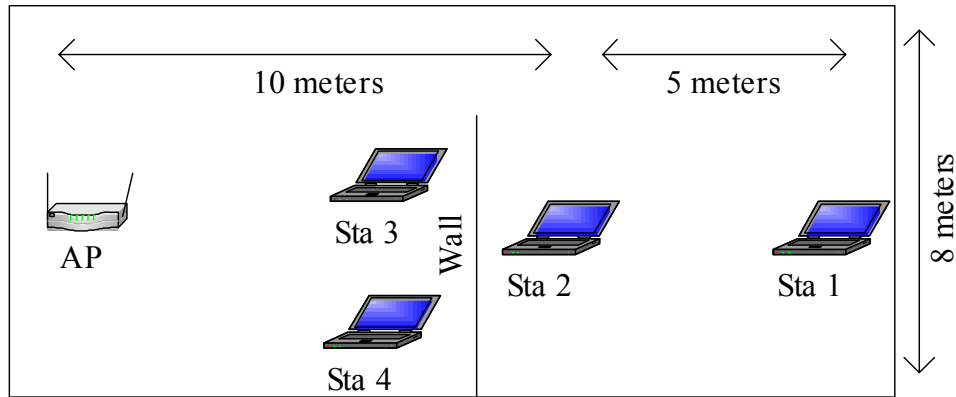


Figura 32. Topologia da rede para os cenários de teste.

A Tabela 11 mostra o parâmetro estimado, $\hat{\theta}$, para todos os cenários testados. A variável aleatória X representa o comprimento de pacotes perdidos consecutivos e Y representa o comprimento de pacotes correctos recebidos consecutivamente. Os débitos de transmissão em bits e pacotes por segundo para cada cenário são apresentados na Tabela 10 e estão relacionados com os tamanhos dos *payloads* dos pacotes RTP. Cada célula da Tabela 11 para cada X e Y mostra os valores $\hat{\theta}$ em cada cenário correspondente a pacotes perdidos ou recebidos, respectivamente. Como referido anteriormente, por exemplo, em S11 os dados de áudio a 4 kbps (R1) são trocados entre ambas as estações, Sta1 e Sta2. Deste cenário resulta uma distribuição de comprimentos de pacotes perdidos consecutivos, com $\hat{\theta}$ igual a 0.292 e 0.287 medido na Sta2 e Sta1, respectivamente. Dando outro exemplo, para explicar a Tabela 11, em S41, a Sta1 envia dados com os débitos R1 e R3 para Sta2, correspondendo a $\hat{\theta} = 0.773$ e $\hat{\theta} = 0.902$, respectivamente. Na Tabela 11, $\hat{\theta}$ foi estimado de (23). É de notar que todas as medidas foram observadas na estação receptora.

Tabela 11. Parâmetro para todos os casos dos cenários testados.

Cenários	Estação 1		Estação 2	
	X	Y	X	Y
S11	0.292	0.992	0.287	0.992
S12	0.278	0.982	0.314	0.981
S21	0.937	0.991	0.937	0.992
S31	0.463	0.925	0.784	0.958
S32	0.387	0.929	0.738	0.975
S41	0.773	0.737	0.754	0.709
	0.902	0.847	0.868	0.857
S42	0.735	0.734	0.735	0.734
	0.902	0.838	0.902	0.838

Analisando a Tabela 11, verifica-se que os valores de $\hat{\theta}$ são para Y próximos de 1 e para X próximos de 0.3, nas condições com cenários de baixos débitos de transmissão. Estes resultados expressam longos comprimentos de pacotes recebidos e curtos comprimentos de pacotes perdidos. No entanto, com o aumento do tráfego na rede, o comprimento dos pacotes perdidos aumenta, assim como $\hat{\theta}$. Por exemplo, nos cenários S3x, a estação Sta2 debita para a rede com débito R3 e recebe da rede com um débito inferior, ambos R1 e R2. Consequentemente, os valores de $\hat{\theta}$ relativos a X são aproximados de 0.4 e 0.75, respectivamente para Sta1 e Sta2. Os valores de $\hat{\theta}$ para Y são sempre superiores a 0.7, o que implica comprimentos de pacotes recebidos grandes ou comportamento *heavy-tailed* das distribuições.

4.2.5 Resultados Experimentais

Da Figura 33 à Figura 36 apresentam-se os gráficos relativos aos dois modelos em estudo e aos dados observados, para X e Y. Nestas figuras pode-se verificar a maior proximidade do modelo proposto, relativamente ao modelo GE. Os cenários representados nas figuras são o S21 e o S11 para as estações Sta1 e Sta2, respectivamente. As equações (7) e (8) foram usadas para estimar os parâmetros do modelo GE, α e β .

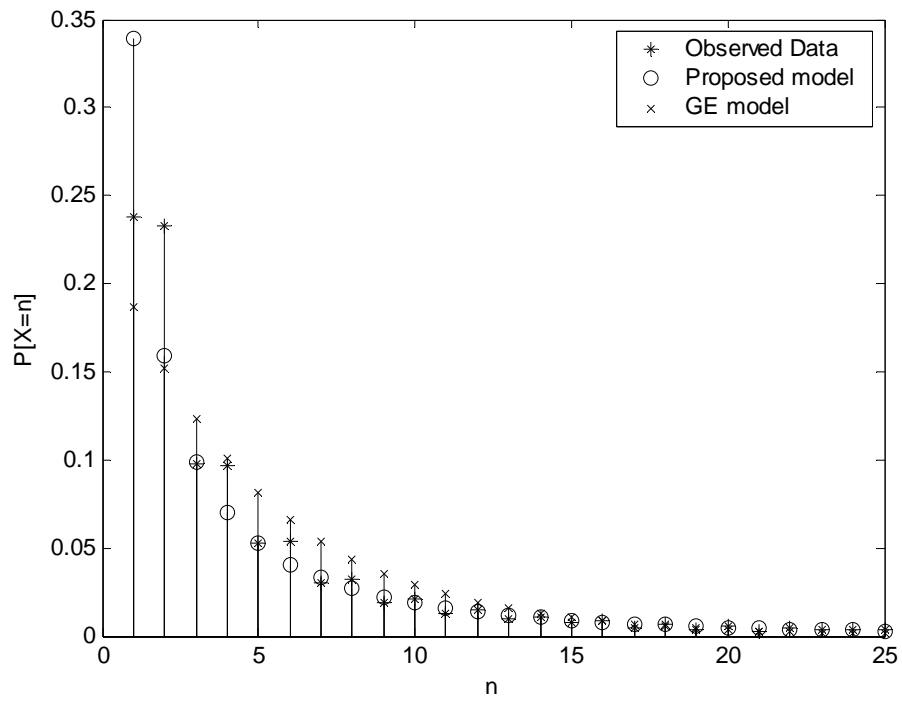


Figura 33. Comprimento de consecutivos pacotes perdidos na Sta2, cenário S21.

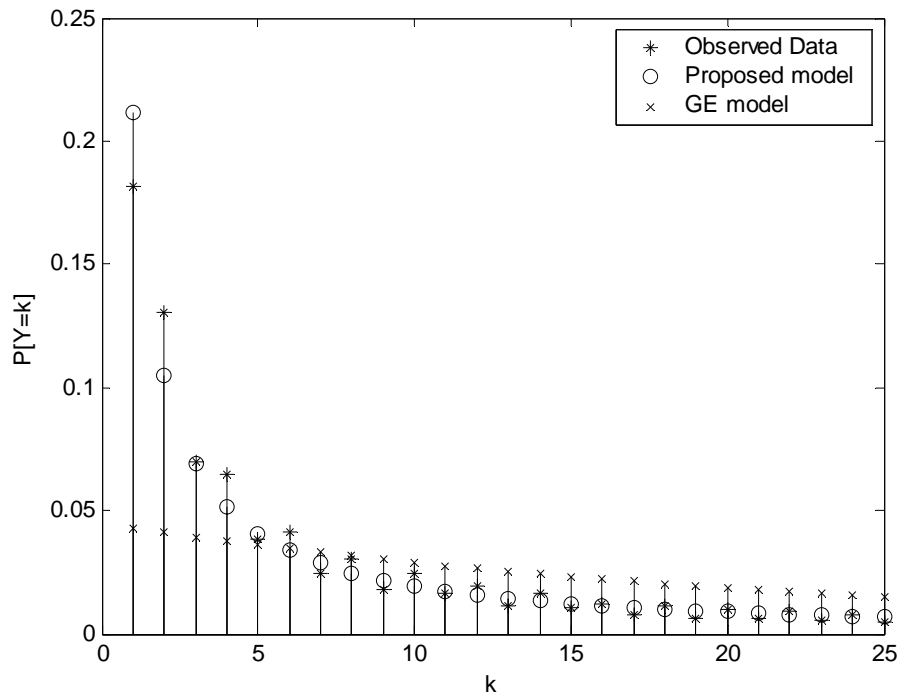


Figura 34. Comprimento de consecutivos pacotes recebidos na Sta2, cenário S21.

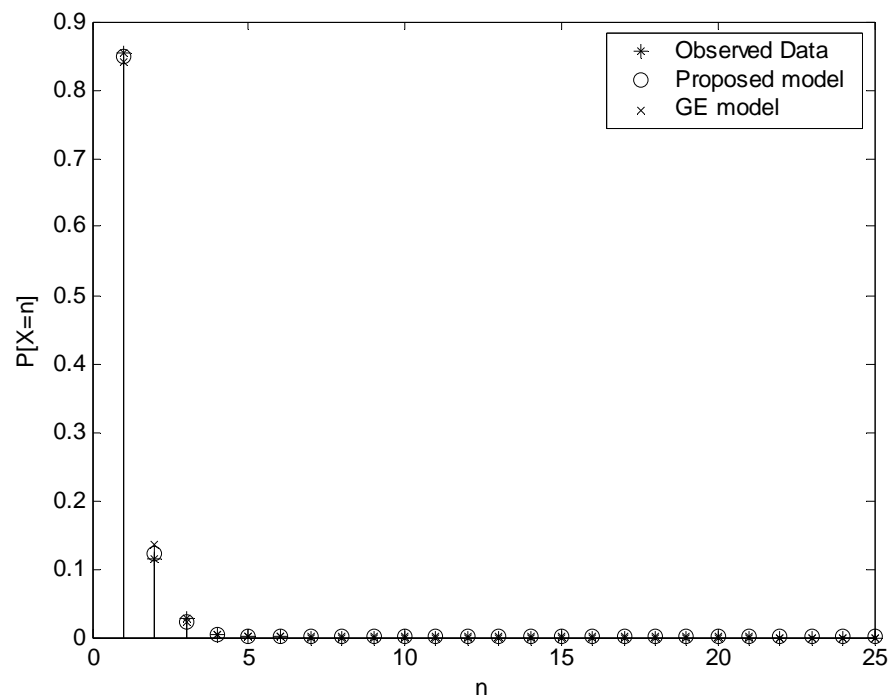


Figura 35. Comprimento de consecutivos pacotes perdidos na Sta1, cenário S11.

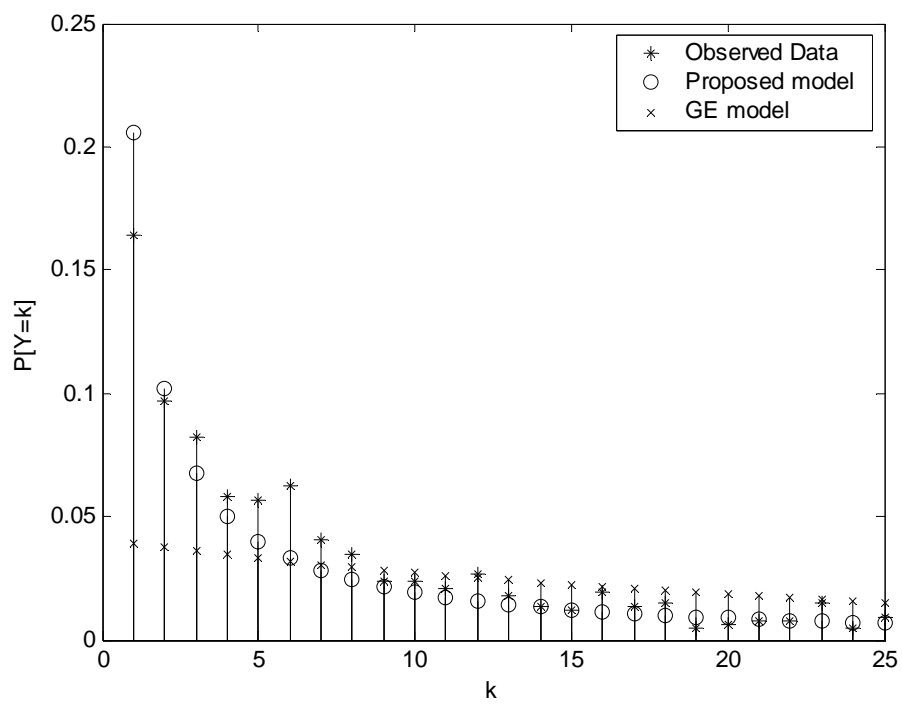


Figura 36. Comprimento de consecutivos pacotes recebidos na Sta1, cenário S11.

Foi calculada a função de correlação cruzada $\rho(i-j)$ dos dados observados, X_i e Y_j , com $i, j \in \{0,1,2,\dots,2750\}$, mostrando uma correlação muito baixa, $|\rho(i-j)| < 0.06$, tal como ilustrado na Figura 37. Do mesmo modo, a função de autocorrelação de X_i e X_{i+m} , e de Y_i e Y_{i+m} , $\forall m \neq 0$, não fornece valores significativos de correlação, $|\rho(m)| < 0.05$. Por esta razão, X_i e Y_j são duas variáveis aleatórias independentes, identicamente distribuídas, denotando dois processos aleatórios estacionários em tempo discreto.

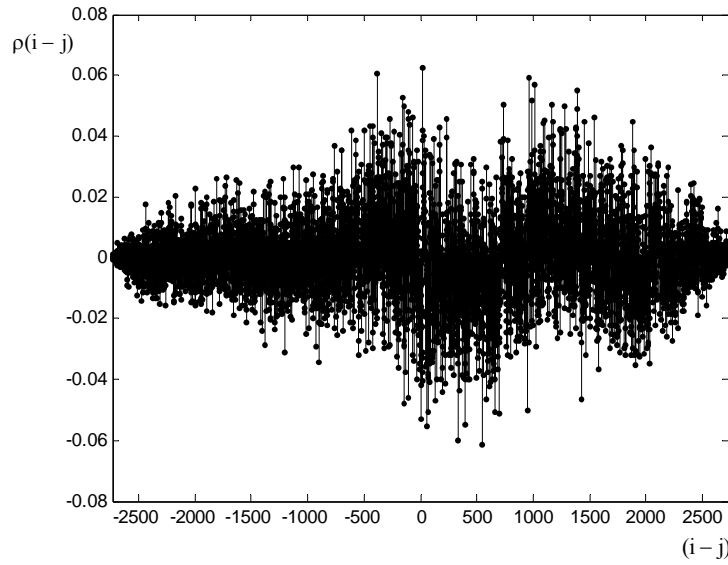


Figura 37. Correlação cruzada para o débito R1 no cenário S41 e Sta2.

4.2.6 Teste Qui-Quadrado

Um teste básico que se pode fazer é a análise comparativa visual dos gráficos entre as distribuições postuladas e a distribuição observada (ver Figura 33 à Figura 36). No entanto, deve-se seguir um método mais formal para a comparação ser validada. Por esta razão efectuou-se o teste do Qui-Quadrado para cada cenário descrito na Tabela 10. A estatística do teste do Qui-Quadrado [49] é definida como a diferença pesada entre o número observado de saídas, N_n , $n \in \{1,2,\dots,I\}$ e o correspondente número esperado M_n ,

$$Z = \sum_{n=1}^I \frac{(N_n - M_n)^2}{M_n} \quad (24)$$

onde,

$$M_n = p_n N \quad (25)$$

e I é o número de intervalos. Para N grande, a variável aleatória Z tem uma função probabilidade Qui-Quadrado com $I-2$ graus de liberdade.

Tabela 12. Resultados do teste Qui-Quadrado.

Cenários	Estação 1				Estação 2			
	X		Y		X		Y	
	Prop	GE	Prop	GE	Prop	GE	Prop	GE
S11	0.24	2.96	63.87	452.78	0.58	3.66	68.06	532.83
S12	1.98	9.92	158.68	190.70	0.74	1.37	107.44	253.67
S21	1074.71	2074.45	335.24	10231.49	1657.75	1368.62	306.66	8977.31
S31	19.84	5.28	132.70	101.54	1803.06	94.75	670.79	6753.68
S32	4.51	20.64	344.69	64.76	1409.05	117.90	947.17	3579.09
S41	50.01	100.28	101.74	3.92	60.99	48.28	94.04	3.29
	1635.75	2007.84	278.02	2822.73	2495.56	7354.64	707.65	2298.01
S42	55.35	19.44	63.03	31.83	55.35	19.44	63.03	31.83
	1485.97	2109.97	208.03	6374.76	1485.97	2109.97	208.03	6374.76

Assumiui-se que $I \leq 25$ (ver Figura 33 à Figura 36) pois comprimentos maiores são raros. Além disso, no teste do Qui-Quadrado, cada intervalo tem de ter mais de cinco observações, $N_n > 5$. Em (24), quanto mais baixo é Z , melhor é o resultado do teste. A Tabela 12 mostra valores de Z para ambas as funções probabilidade, geométrica (modelo GE) e LSD (modelo proposto). Por exemplo, na Figura 33 e Figura 34, para o modelo proposto obteve-se um $Z=1074.71$ e $Z=335.24$ enquanto que os valores de Z para o GE foram 2074.45 e 10231.49, respectivamente. Embora as hipóteses tenham sido rejeitadas pelo teste do Qui-Quadrado em 86.1% de todos os casos, o modelo proposto foi 63.9% superior ao GE. Esta percentagem foi determinada pelo quociente entre o número de casos em que o modelo proposto foi melhor do que o modelo GE (igual a 23) e o número total de casos testados (igual a 36, ver Tabela 12).

4.2.7 Débitos de transmissão para o vídeo

Apesar dos débitos de 4 kbps e 13 kbps serem débitos típicos na compressão digital de voz e o débito de 256 kbps ser um dos vários débitos possíveis para transmissão de vídeo digital, ampliou-se o cenário S21 do modelo, de forma a abranger outros débitos de transmissão de vídeo. Neste sentido, determinou-se $\hat{\theta}$ em função dos débitos de transmissão trocados entre ambas as estações Sta1 e Sta2. Em adição aos 256 kbps, testaram-se mais cenários do tipo S2x com débitos de 32, 64, 128 e 512 kbps. De todos os dados recolhidos e tendo em conta a distribuição de comprimento de pacotes consecutivos recebidos definido por (10) com Y a substituir X, $\hat{\theta}$ é quase constante e igual a 0.9983. A Figura 38 ilustra os valores de $\hat{\theta}$ para a distribuição de comprimento de pacotes consecutivos perdidos, $P[X]$.

Observando a Figura 38, conclui-se que o valor de $\hat{\theta}$ é independente do débito de transmissão. Na realidade depende apenas dos débitos de pacote (PR – *Packet Rate*). Assim, a curva da melhor aproximação para $\hat{\theta}$, fazendo a média dos cinco débitos de bit testados em ambas as estações, é dada por

$$\hat{\theta} = 0.387 \log_8(\text{PR} - 15.87), \quad 25 \leq \text{PR} \leq 200. \quad (26)$$

A expressão (26) é traçada na Figura 39 com a curva dos dados observados. Efectuou-se cada teste trocando 360 mil pacotes entre ambas as estações. A sobrecarga dos *buffers* no AP é a razão principal para a perda dos pacotes. Por este motivo, o valor de $\hat{\theta}$ na distribuição de comprimento de pacotes perdidos depende do tráfego total da rede. A equação (26) e a curva de $\hat{\theta}$ na Figura 39 correspondem a metade do tráfego total fonte. Por exemplo, caso o tráfego total na rede seja apenas produzido por uma estação debitando 200 pacotes/s, o valor de $\hat{\theta}$ é obtido pela substituição de PR por 100, em (26). A expressão (26) é então válida para um tráfego fonte total entre 50 a 400 pacotes/s. Considerou-se um tráfego interferente na rede de 12.2 Mbps com apenas um AP.

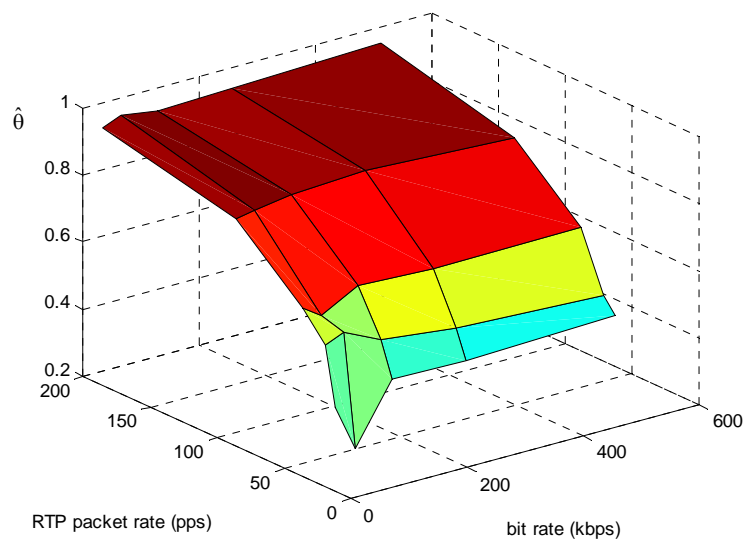


Figura 38. Valores de $\hat{\theta}$ vs débito de transmissão de pacotes e bits na Sta1.

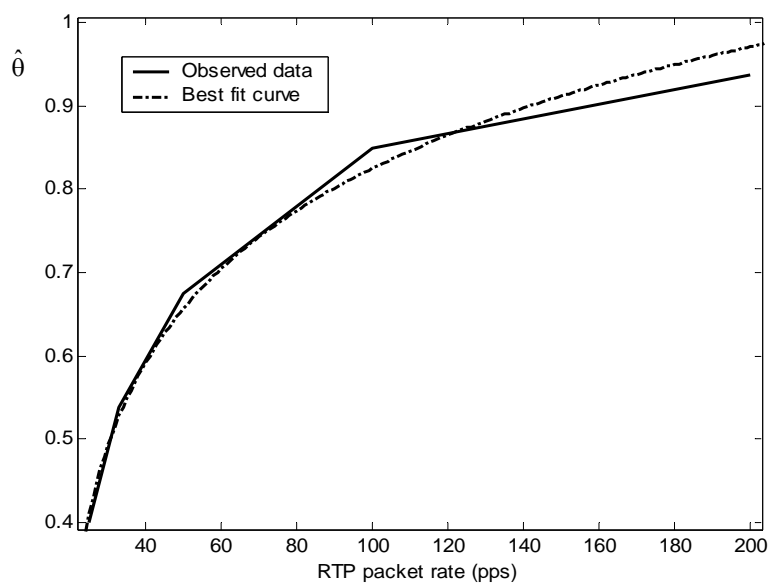


Figura 39. Curva da melhor aproximação a $\hat{\theta}$ na distribuição de pacotes perdidos.

4.2.8 Importância do modelo proposto

O modelo de rede proposto neste capítulo, facilita o estudo do desempenho de *codecs* utilizados em comunicações multimédia sobre a rede 802.11g. O objectivo do modelo é prever os padrões de perda de pacotes quando a rede encontra-se sobrecarregada

com tráfego. Partindo desta previsão, pode-se simular as perdas de informação a que uma sessão de áudio ou vídeo estará sujeita. Seguidamente apresentam-se dois trabalhos, publicados por outros colaboradores do projecto TRIVial, relativos ao teste de desempenho de codificadores de áudio e de vídeo. Ambos os trabalhos baseiam-se no modelo de perda de pacote apresentado na presente dissertação.

O primeiro trabalho [53] estuda o desempenho dos codificadores de áudio MPEG-4 HVXC [15] e iLBC [56] (*Internet Low Bit Rate Coding*). Este estudo permitiu concluir que, em média, o codificador iLBC tem um desempenho superior ao HVXC. Isto para comunicações sobre a rede 802.11g segundo as condições do modelo proposto. A Figura 40 apresenta as percentagens de perda de pacotes de áudio para os cenários S11 e S41, mencionados na Tabela 10. A medida de qualidade MOS (*Mean Opinion Score*), permite comparar o conteúdo de áudio corrompido com erros com o conteúdo original. Os valores de MOS para os codificadores de áudio estudados são apresentados na Tabela 13. A Figura 41 apresenta a medida de qualidade MOS para ambos os cenários e codificadores de áudio, após a perda de pacotes provocada pela rede 802.11g. Verifica-se que quanto maior a perda de pacotes, menor é o valor do parâmetro MOS comparado com o valor de referência apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Qualidade MOS dos codificadores de voz.

Codificador Voz	MPEG-4 HVXC	iLBC
Qualidade MOS	3.2	3.9

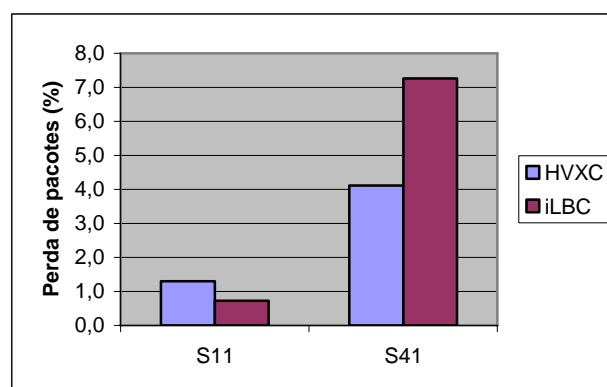


Figura 40. Percentagem média de perda de pacotes de áudio.

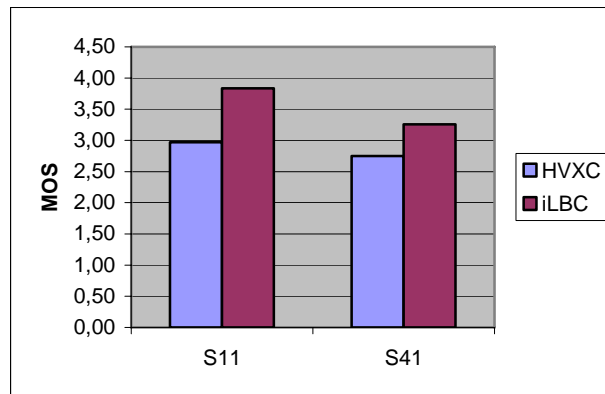


Figura 41. Valor de MOS resultante de áudio corrompido pela rede.

Foram ainda publicados testes preliminares do desempenho de dois codificadores de vídeo em [54] para comunicações sobre a rede 802.11g. Neste segundo trabalho é mostrado para os cenários S21 e S31 a perda de qualidade de vídeo codificado com MPEG-4 [16] (Figura 43) e H.264 [38] (Figura 44). A Figura 42 mostra as percentagens médias de perda de pacotes de vídeo nos respectivos cenários. A qualidade do vídeo codificado sem erros é de 34.5 dB e 38.7 dB, respectivamente para os codificadores MPEG-4 e H.264. Os parâmetros relativos aos codificadores de vídeo são apresentados na Tabela 14 para o MPEG-4 e na Tabela 15 para o H.264.

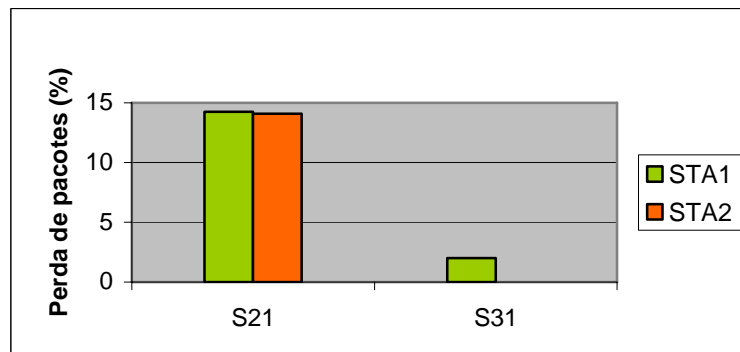


Figura 42. Percentagem média de perda de pacotes de vídeo.

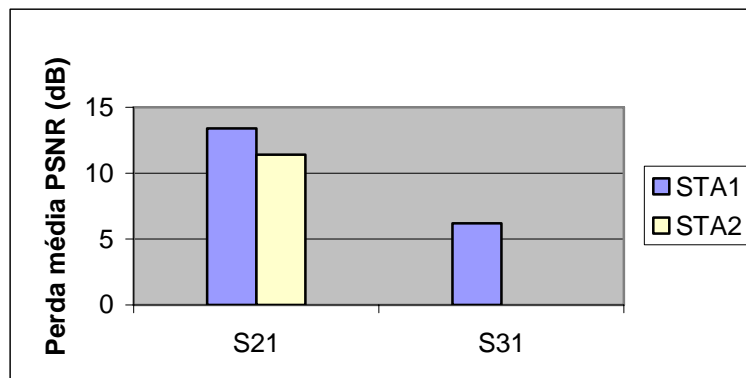


Figura 43. Perda de qualidade de vídeo para MPEG-4.

Tabela 14. Parâmetros codificador de vídeo MPEG-4.

<i>Source resolution</i>	<i>QCIF (176*144)</i>
<i>Source frame rate</i>	<i>30 Hz</i>
<i>Number of video objects</i>	<i>1</i>
<i>Number of layers</i>	<i>1 (single layer coding)</i>
<i>VOL frame rate</i>	<i>30 Hz</i>
<i>Target bit rate</i>	<i>256 kbps</i>
<i>Rate control</i>	<i>VM5+</i>
<i>Bits per pixel</i>	<i>8</i>
<i>INTRA period</i>	<i>60 frames</i>
<i>B-VOPs</i>	<i>Not used</i>
<i>Video packets</i>	<i>Enabled</i>
<i>Video packet size</i>	<i>160 bytes</i>
<i>Data partitioning</i>	<i>Disabled</i>
<i>RVLC</i>	<i>Enabled but not used</i>
<i>AIR</i>	<i>Disabled</i>
<i>NEWPRED</i>	<i>Disabled</i>

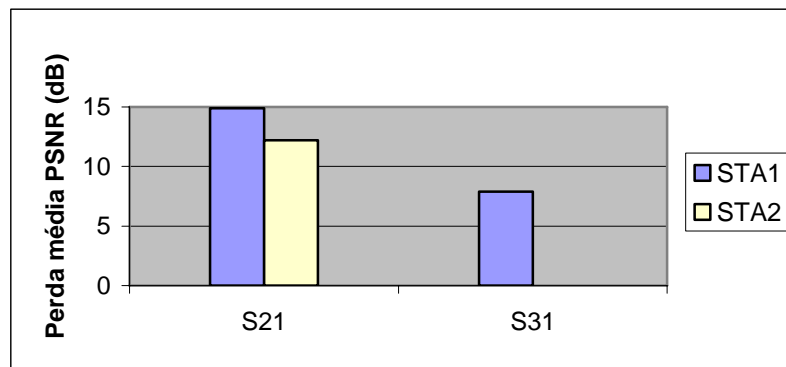


Figura 44. Perda de qualidade de vídeo para H.264.

Tabela 15. Parâmetros do codificador de vídeo H.264.

<i>Source resolution</i>	<i>QCIF (176*144)</i>
<i>Source frame rate</i>	<i>30 Hz</i>
<i>Target bit rate</i>	<i>256 kbps</i>
<i>Bits per pixel</i>	<i>8</i>
<i>INTRA period</i>	<i>60 frames</i>
<i>No. of reference frames used in P/B prediction</i>	<i>5</i>
<i>Data partitioning mode</i>	<i>None</i>
<i>Video packets</i>	<i>Enabled</i>
<i>Quantization parameter for I/P/B frames</i>	<i>25</i>
<i>Search range restrictions</i>	<i>none</i>
<i>Entropy coding method</i>	<i>CABAC</i>
<i>SP pictures</i>	<i>Disabled</i>
<i>FMO (Flexible Macroblock Ordering)</i>	<i>Disabled</i>

Com este capítulo finaliza-se o estudo individual das redes sem fios a que esta dissertação se propõe. Mais uma vez se verifica que o estudo do comportamento da rede é um dado importante para evitar a ocorrência de erros na comunicação. Por exemplo,

segundo o estudo efectuado, na rede 802.11 deve-se baixar tanto quanto possível o débito de pacotes de forma a diminuir o comprimento de consecutivos pacotes perdidos.

Inicia-se o próximo capítulo com uma apresentação de testes de campo preliminares relacionados com o projecto NAVIO, e termina-se com um estudo analítico do desempenho de uma comunicação que integra as duas redes sem fios previamente estudadas nesta dissertação.

CAPÍTULO 5

SISTEMA TOTAL COM REDES HF E WLAN

O presente capítulo é reservado à idealização dum sistema de comunicações multimédia constituído por ambas as redes estudadas. A topologia de rede deste sistema é descrita, assim como a implementação real de parte do sistema nomeadamente do controlo de sessão multimédia e do “HF Gateway”. Apresentam-se ainda testes de campos executados com a plataforma de comunicação multimédia sobre o canal HF. Descrevem-se os cenários testados em laboratório e com a infra-estrutura de comunicações HF da Marinha. O capítulo termina com a análise da integração de ambas as redes a servirem de suporte a um possível sistema de comunicação multimédia, extremo a extremo. Esta última análise, embora não testada na realidade, é resultado do conhecimento adquirido no decorrer dos estudos executados. O sistema idealizado é constituído por uma ligação HF entre dois “HF Gateways” para duas redes WLAN 802.11.

5.1. Implementação do “HF Gateway”

A interligação entre as duas redes (WLAN e HF) é feita pelo elemento de rede designado por “HF Gateway”. Este elemento de rede está preparado para interligar ao canal HF uma rede Ethernet ou uma rede WLAN. A Figura 45 ilustra a posição física deste elemento de rede na topologia de rede dum cenário real.

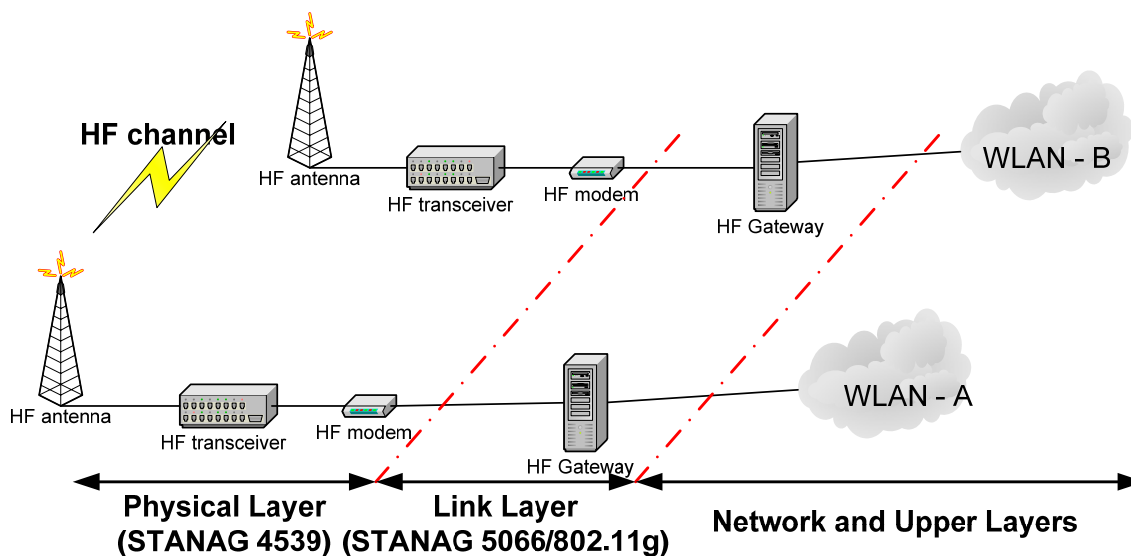


Figura 45. Ilustração do posicionamento do “HF Gateway”.

As características seguintes foram implementadas no “HF Gateway”:

- *Channel Access Mechanisms* (Annex B STANAG 5066).
- Todos os pacotes com modo de transmissão NON-ARQ da STANAG 5066.
- Algoritmo para compressão/descompressão de pacotes IP/UDP/RTP.
- Mecanismos para encaminhar pacotes IP entre as redes Ethernet (ou WLAN) e HF, e vice versa.

A Figura 46 ilustra o diagrama de blocos do “HF Gateway”.

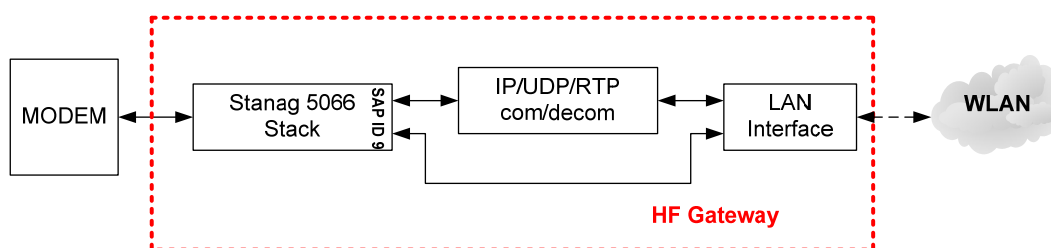


Figura 46. Diagrama de blocos do WLAN/HF Network Gateway.

5.2. Análise de sincronização da sessão multimédia

Antes de um cliente enviar qualquer tipo de informação multimédia para a rede, deverá saber se existe um cliente receptor sincronizado consigo a nível aplicacional. Inicialmente a sincronização é feita recorrendo a um protocolo de controlo de sessão, o qual é responsável pelas seguintes tarefas:

- Localização do cliente.
- Disponibilidade do cliente.
- Capacidades multimédia do cliente.
- Estabelecimento da sessão.
- Gestão da sessão.

Implementou-se o *Session Initiation Protocol* (SIP) [3] para executar a segunda e a quarta tarefa apresentadas anteriormente. No diagrama temporal, da Figura 47, é ilustrado o início e o fim duma comunicação multimédia extremo a extremo. Nesta figura podem-se visualizar as mensagens SIP trocadas entre ambos os clientes multimédia. Um dos clientes inicia a sessão enviando uma mensagem de *INVITE* para o outro cliente. Caso o segundo cliente esteja activo, confirma a recepção do *INVITE* respondendo com mensagem *180 Ringing*. Ao aceitar a ligação, o segundo cliente envia ainda uma mensagem *200 OK*. O cliente que iniciou a sessão confirma estabelecimento da mesma com envio duma mensagem de confirmação *ACK*. A partir do momento que a sessão está estabelecida os clientes trocam, entre si, conteúdos multimédia em tempo real recorrendo ao protocolo RTP. O fim da sessão pode ser pedido por ambos os clientes, através da troca das mensagens de *BYE* e *200 OK*, como ilustrado no diagrama temporal da Figura 47.

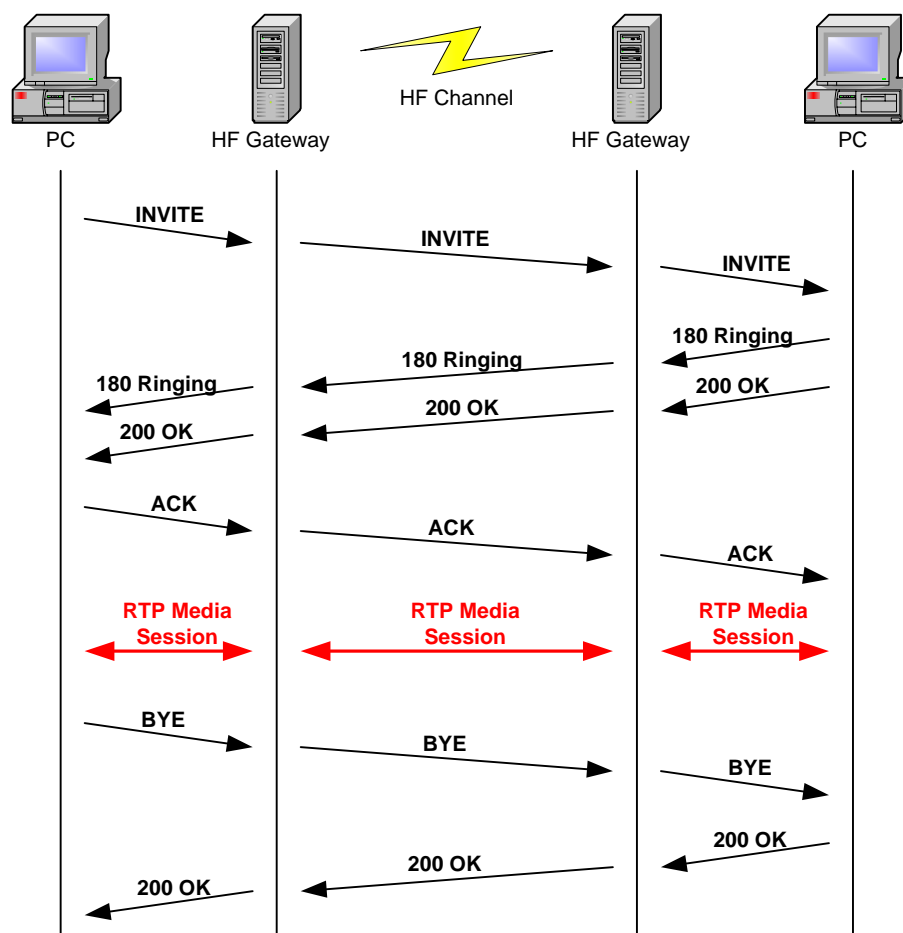


Figura 47. Fluxo de mensagens SIP.

5.2. Testes de funcionamento da plataforma

5.2.1 Medida de atraso do *modem*

Nesta secção são apresentadas medidas relativas ao atraso introduzido pelo *modem* na comunicação.

Dependendo da modulação, *interleaver* ou FEC usado, são medidos diferentes atrasos. No laboratório testou-se o atraso do *modem* com duas modulações disponíveis: “STANAG 5066 Annex G” e “STANAG 4539”. Este teste baseou-se no envio de pacotes com tamanho fixo do DTE (*Data Terminal Equipment*) para o *modem*, de forma a medir o atraso de retorno dos pacotes ao DTE. No DTE é executada uma aplicação que regista os instantes de tempo em que o mesmo pacote foi enviado e recebido do *modem*, de forma a

determinar o atraso do pacote a ser processado dentro do *modem*. Para este teste usaram-se pacotes com 256 *bytes* de comprimento.

Inicialmente, e como padrão do atraso de processamento do *software* usado, a experiência foi executada enviando pacotes para a porta RS-232 do computador curto circuitada (com um *loop* directo para a mesma). O atraso determinado foi de 134 ms. Este atraso era esperado, pois a porta série estava configurada com um *baud rate* de 19200 bps, sem paridade, um *start bit*, um *stop bit* e 8 bits de dados, o que perfaz um total de 10 bits por cada *byte* de dados enviado. Então o atraso esperado é:

$$\text{Atraso} = \frac{256 \times 10}{19200} = 133.3 \text{ ms} \quad (27)$$

Posteriormente, para medir o atraso do *modem*, o curto circuito é mudado da porta série do PC para o painel exterior do *modem* Radio A conector (J2) [22] (ligação de entrada e saída para o *transceiver*). Ligou-se também o DTE ao *modem* por RS-232 com um *baud rate* 19200 bps, sem paridade, um *start bit*, um *stop bit* e 8 bits de dados. A experiência é repetida com o envio de pacotes de 256 *bytes* de comprimento. O atraso medido é de cerca de 760 ms, com a modulação STANAG 4539 e débito de transmissão 12800 bps sem codificação FEC. Analisando estas medidas, conclui-se que o atraso introduzido pelo *modem* é de cerca de $760 - 134 = 626$ ms.

5.2.2 Envio de pacotes de voz pelo *modem*

Implementou-se a topologia de rede ilustrada pela Figura 48. Este teste, também executado em laboratório, tem como objectivo passar pacotes de voz pelo *modem*. A voz adquirida pelo microfone é multiplexada em pacotes no PC, que são enviados para o “HF Gateway”, que por sua vez os encaminha para a rede HF pela sua interface RS-232. No *modem* os pacotes são reenviados de novo para o “HF Gateway” para serem encaminhados e tocados pelas colunas do PC.

O atraso observado desde a aquisição da voz até ao instante de reprodução nas colunas é de mais ou menos 1 segundo. Este atraso é esperado, pois os pacotes de áudio encapsulam 5 *frames* de áudio de 20 ms. Adicionando-se o atraso inserido pelo *modem* na

comunicação com os 100 ms de aquisição do sinal de áudio perfaz um atraso total de 860 ms.

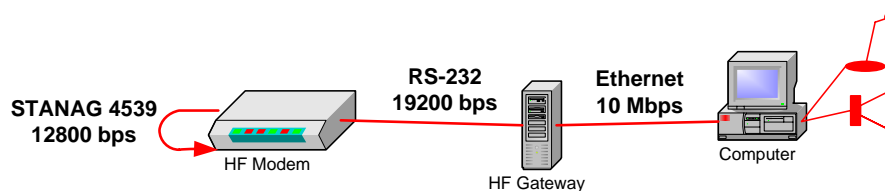


Figura 48. Topologia de rede.

5.2.3 Testes de campo

Os testes de campo são executados em duas fases. A primeira fase consiste em testes de laboratório com ambos os *modems* HF ligados directamente, tal como ilustrado na topologia de rede da Figura 49. A segunda fase consiste em testes de campo usando dois canais HF, tal como ilustrado na topologia de rede da Figura 50. Em ambas as fases são estabelecidas várias comunicações multimédia entre os clientes localizados nos extremos.

5.2.4 Descrição dos testes laboratoriais

A Tabela 16 e a Tabela 17 apresentam os débitos de bit calculados e originados pelo encapsulamento de pacotes RTP em D_PDUs sobre o canal HF. A Tabela 16 é relativa a pacotes RTP com compressão, enquanto que a Tabela 17 é relativa a pacotes RTP sem compressão. A vantagem da compressão dos cabeçalhos dos pacotes RTP é diminuir o débito de informação enviada para canal HF, devido à diminuição do *overhead* dos cabeçalhos, tal como se pode verificar na última coluna das tabelas. Em ambas apresentam-se sete combinações de conteúdos multimédia encapsulados em pacotes RTP:

- Casos 1 e 2: são relativos ao encapsulamento de voz comprimida a 2 e a 4 kbps respectivamente (aquisição do sinal de voz demora 100 ms).
- Casos 3 e 4: são relativos ao encapsulamento de FAPs extraídas a uma taxa de 10 *frames* por segundo e voz comprimida a 2 e a 4 kbps, respectivamente (aquisição do sinal de voz demora 100 ms).

- Casos 5 e 6: são relativos ao encapsulamento de FAPs extraídas a uma taxa de 20 *frames* por segundo e voz comprimida a 2 e a 4 kbps, respectivamente (aquisição do sinal de voz demora 100 ms).
- Caso 7: é relativo ao encapsulamento de FAPs extraídas a uma taxa de 10 *frames* por segundo e voz comprimida a 2 kbps (aquisição do sinal de voz demora 200 ms).

Tabela 16. Débitos do canal HF com compressão do cabeçalho do RTP.

	RTP <i>payload</i> (bytes)		Cabeçalho STANAG 5066 (bytes)	Cabeçalho RTP (bytes)	Tamanho de Pacote		Débito Canal HF (bps)
	Voz	FAPs			bytes	bits	
1	25	0	34	2	61	488	4880
2	50	0	34	2	86	688	6880
3	25	28	34	2	89	712	7120
4	50	28	34	2	114	912	9120
5	25	45	34	2	106	848	8480
6	50	45	34	2	131	1048	10480
7	50	45	34	2	131	1048	5240

Tabela 17. Débitos do canal HF sem compressão do cabeçalho do RTP.

	RTP <i>payload</i> (bytes)		Cabeçalho STANAG 5066 (bytes)	Cabeçalho RTP (bytes)	Tamanho de Pacote		Débito Canal HF (bps)
	Voz	FAPs			bytes	bits	
1	25	0	34	12	71	568	5680
2	50	0	34	12	96	768	7680
3	25	28	34	12	99	792	7920
4	50	28	34	12	124	992	9920
5	25	45	34	12	116	928	9280
6	50	45	34	12	141	1128	11280
7	50	45	34	12	141	1128	5640

Nos *modems* Harris [22] são seleccionadas para as modulações STANAG 4539 os seguintes quatro modos de transmissão:

- A. 64QAM a 12800 bps (*uncoded*).
- B. 64QAM a 9600 bps (*code rate $\frac{3}{4}$ e interleaving delay very short - VS*).
- C. 32QAM a 8000 bps (*code rate $\frac{3}{4}$ e interleaving delay very short - VS*).
- D. 16QAM a 6400 bps (*code rate $\frac{3}{4}$ e interleaving delay very short - VS*).

Os catorze casos de débitos de bit da Tabela 16 e Tabela 17 são associados com os quatro modos de transmissão de canal da STANAG 4539 especificados anteriormente (de A a D). A Tabela 18 é o resultado da associação feita, na qual as células marcadas com ‘X’ representam os casos dos débitos de bits (numerados de 1 a 7) que a ser utilizados com os modos de transmissão de canal seleccionados (numerados de A a D).

Tabela 18. Casos possíveis.

	Cabeçalho RTP comprimido				Cabeçalho RTP não comprimido			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X		X	X	X	
3	X	X	X		X	X	X	
4	X				X	X		
5	X	X			X	X		
6	X				X			
7	X	X	X	X	X	X	X	X

Estabeleceu-se a ligação da topologia de rede ilustrada na Figura 49. Em cada PC (UMBRIEL ou TOLKIEN) executaram-se duas aplicações de *software*: aplicação cliente multimédia e aplicação de “HF Gateway”. Os passos da comunicação são apresentados de seguida:

1. O cliente multimédia, no UMBRIEL, gera pacotes RTP com conteúdos multimédia e pacotes SIP com mensagens de controlo de sessão.
2. Ambos os pacotes (SIP e RTP) são enviados para a aplicação “HF Gateway” (internamente em cada PC);
3. O “HF Gateway” encapsula os pacotes em STANAG 5066 NON-ARQ e encaminhando-os para o *modem* HF 2;
4. No outro extremo, no TOLKIEN, a aplicação de “HF Gateway” recebe os pacotes D_PDUs do *modem* HF 1, analisa-os e extrai os pacotes RTP e SIP;
5. De seguida os pacotes são encaminhado para o cliente multimédia;
6. Esta aplicação analisa os pacotes e descodifica os conteúdos multimédia para a apresentação da voz e das FAPs.

O cenário descrito acontece em ambos os sentidos, isto é, em *full duplex*.

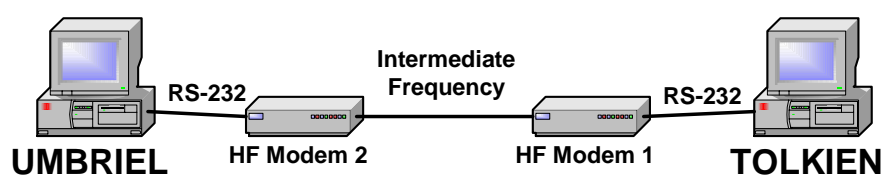


Figura 49. Topologia de rede usada para testes laboratoriais.

Foram testados todos os casos marcados na Tabela 18. As medidas de perda de pacotes são nulas para todos os casos.

5.2.5 Teste infra-estrutura HF

Nesta segunda fase, seguiu-se o mesmo procedimento utilizado na primeira. Desta vez testam-se dois *modems* HF, ligados por dois canais HF tal como é ilustrado na topologia de rede da Figura 50.

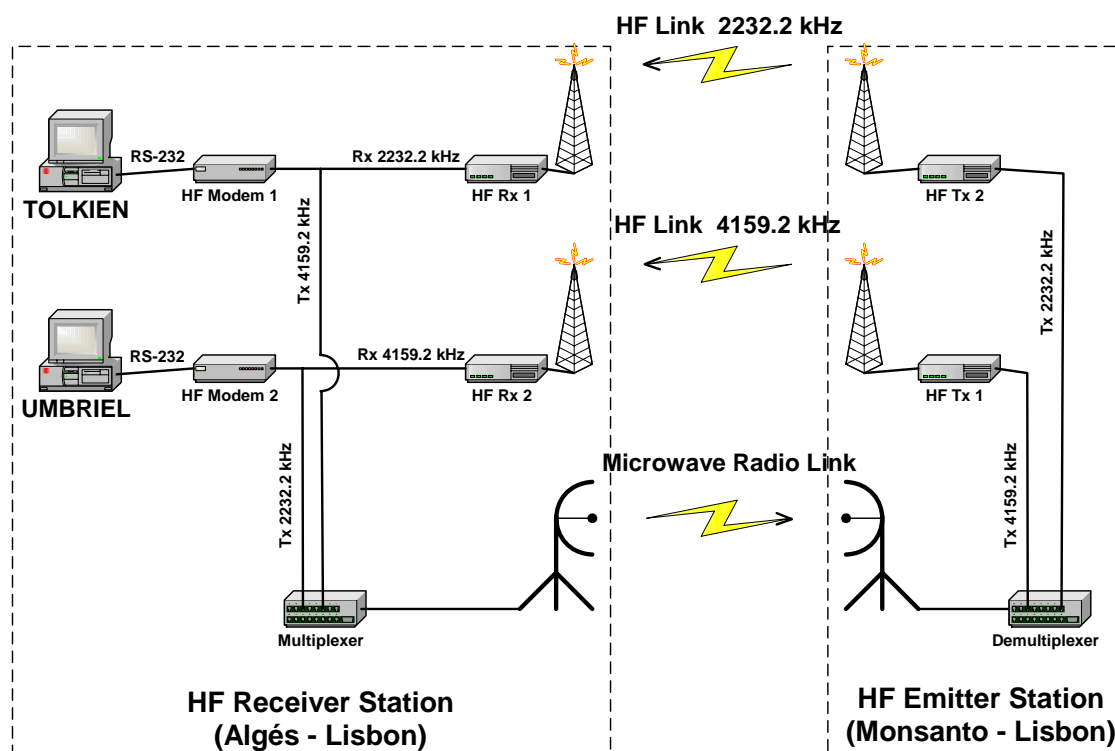


Figura 50. Topologia de rede usada para testes de campo.

As estações emissora e receptora de HF estão fisicamente localizadas em Monsanto e Algés, respectivamente. Os sinais transmitidos são transportados para a estação emissora por uma ligação de rádio microondas, tal como ilustrado na Figura 50. O PC TOLKIEN é ligado ao *modem* HF 1, que por sua vez está ligado ao receptor e emissor a operar às frequências de 2232.2 e 4159.2 kHz, respectivamente. O PC UMBRIEL é ligado ao *modem* HF 2, ligado ao receptor e emissor a operar às frequências de 4159.2 e 2232.2 kHz, respectivamente.

Os testes são executados a começar do modo de transmissão com o canal mais fiável seleccionado (D) para os menos fiáveis (C, B and A). Quando se testa o modo de transmissão B, as percentagens de pacotes perdidos são da ordem dos 100%. As células marcadas 'X' na Tabela 19 assinalam os casos em que existe transmissão com sucesso. Analisando a tabela verifica-se que só se conseguiu transmitir com as combinações de encapsulamento 1, 2, 3 e 7 apresentadas no início da subsecção anterior. Para estas quatro combinações, apenas se transmitiu com os modos de transmissão assinalados com as letras C e D, ou seja, 32QAM a 8000 bps e 16QAM a 6400 bps, respectivamente. Na Tabela 20

são apresentadas as percentagens de perda de pacotes medidas na aplicação “HF Gateway” receptora, dos casos de transmissão bem sucedidos.

Tabela 19. Casos de transmissão bem sucedidos.

	Cabeçalho RTP comprimido				Cabeçalho RTP não comprimido			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1			X	X			X	X
2			X				X	
3			X				X	
7			X	X			X	X

Tabela 20. Percentagem de perda de pacote no receptor.

	Tolkien como Receptor		Umbriel como Receptor	
	sem compressão cabeçalho	com compressão cabeçalho	sem compressão cabeçalho	com compressão cabeçalho
1 D	0,67	3,61	0,23	3,14
1 C	0,24	1,49	28,16	99,52
2 C	4,19	0,97	37,99	35,75
3 C	0,00	5,78	33,18	97,06
7 D	0,90	5,29	0,92	3,86
7 C	0,00	8,54	48,33	100,00

Verifica-se através das percentagens de perda de pacotes apresentadas na Tabela 20, que o canal HF a operar a 4159.2 kHz teve maior percentagem de perda de pacotes. No receptor, o *display* do *modem* ligado ao PC TOLKIEN oscila entre 19 e 20 dB para valores de SNR. As percentagens obtidas de perda de pacotes são em alguns casos inferiores às alcançadas por simulação (ver Figura 18, 1,7% para 16QAM e 6,5% para 32QAM), devido aos testes serem realizados com as antenas em linha de vista. No outro receptor, o SNR mostrado no *modem* ligado ao PC UMBRIEL oscila entre 16 e 17 dB. Estes valores de SNR inferiores são derivados a problemas existentes na infra-estrutura de comunicações HF (possivelmente o sistema de recepção).

5.3. Estimativa da perda de pacote resultante das duas redes

Nesta secção apresenta-se uma análise da integração de ambas as redes, estudadas ao longo da dissertação, num sistema de comunicações multimédia extremo a extremo. Tendo em conta as probabilidades de perda de pacote P_{HF} e P_{WLAN} em ambas as redes HF e WLAN, respectivamente, determina-se a partir da expressão (28) a probabilidade de perda de pacote (P_{PP}) resultante da passagem dos pacotes RTP por ambas as redes. Sendo P_{HF} e P_{WLAN} as respectivas probabilidades de perda de pacote nas rede HF e WLAN, então $1-P_{HF}$ e $1-P_{WLAN}$ são as probabilidades de não perda de pacote nas redes HF e WLAN, respectivamente. O produto das probabilidades de não perda de pacote em ambas as redes, resulta na probabilidade dum pacote transmitido extremo a extremo não ser perdido. A probabilidade de perda de pacote P_{PP} extremo a extremo é dada pela expressão (28). No caso de em cada extremidade da ligação HF existir uma rede WLAN, então a perda de pacote extremo a extremo será dada pela expressão (29). O expoente dois na diferença $(1-P_{WLAN})$ permite determinar a probabilidade de não perda de pacote em duas WLANs, localizadas nos extremos da ligação HF.

$$P_{PP}=1-(1-P_{HF})*(1-P_{WLAN}) \quad (28)$$

$$P_{PP}=1-(1-P_{HF})*(1-P_{WLAN})^2 \quad (29)$$

Para se verificar graficamente o resultado da perda de pacotes em ambas as redes, são seleccionadas as curvas de percentagem de perda de pacote no canal HF para o Caso 2 da Tabela 7. Estas curvas representam P_{HF} para débitos de transmissão de pacote de 10 e 5 pacotes por segundo. É ainda seleccionado o cenário S11 da Tabela 10 para determinar a perda de pacote na rede WLAN (P_{WLAN}) para um débito de transmissão de 10 pacotes por segundo. Tendo em conta os valores de $\hat{\theta}$ determinados para as distribuições das variáveis aleatórias X e Y, o valor médio destas distribuições, $E[X]$ e $E[Y]$ respectivamente, pode ser obtido a partir das expressões (11) e (12). Sabendo $E[X]$ e $E[Y]$, a probabilidade de perda de pacote é obtida pela expressão (9). A Figura 51 e a Figura 52 apresentam os resultados analíticos de perda de pacote para uma comunicação extremo a extremo, onde apenas um dos extremos da ligação HF (sem e com diversidade, respectivamente) é

terminado por uma rede WLAN. Neste caso, o extremo da ligação HF que não é terminado pela rede WLAN contém o cliente multimédia no mesmo PC do “HF Gateway”. A Figura 53 e a Figura 54 apresentam os resultados analíticos de perda de pacote para uma comunicação extremo a extremo, constituída por duas redes WLAN e uma ligação HF sem e com diversidade, respectivamente.

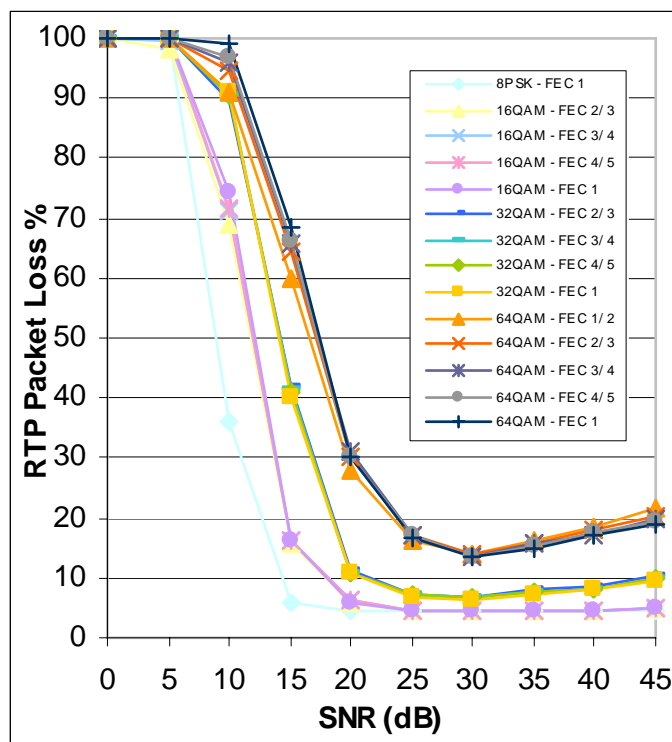


Figura 51. Perda pacote HF e WLAN (canal HF *good* e sem diversidade).

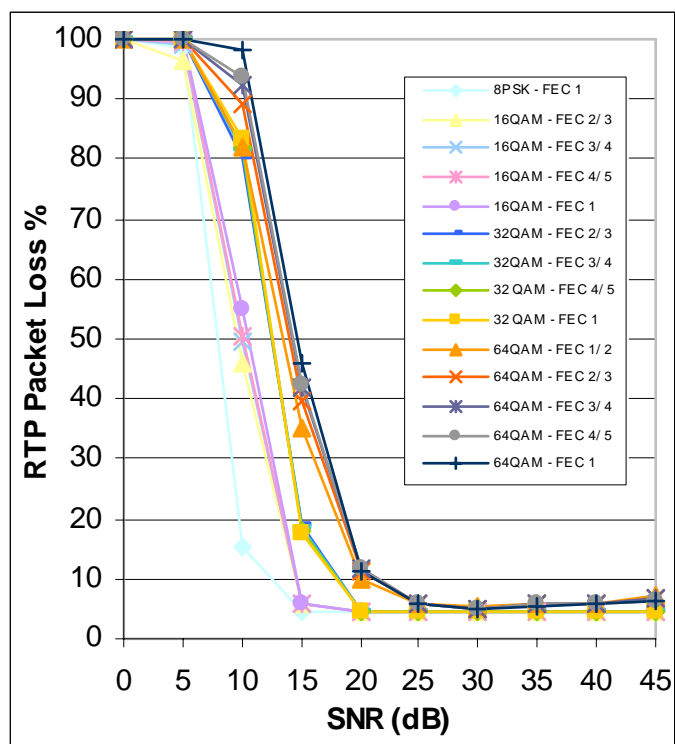


Figura 52. Perda pacote HF e WLAN (canal HF *good* e com diversidade).

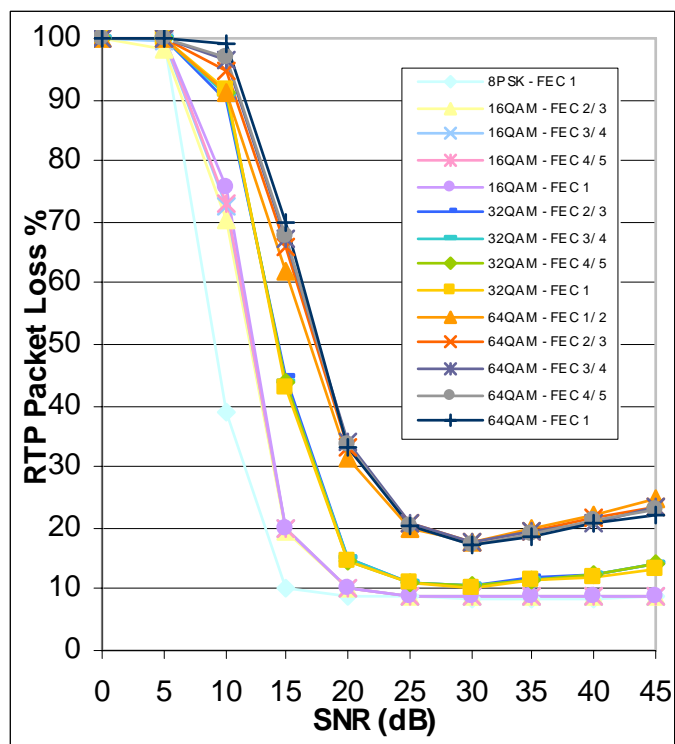


Figura 53. Perda pacote HF com duas WLANs (canal HF *good* e sem diversidade).

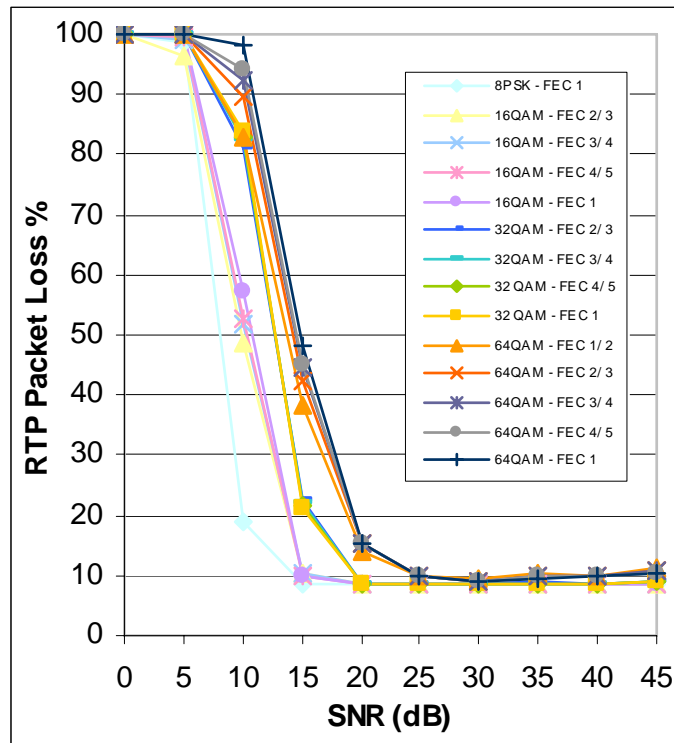


Figura 54. Perda pacote HF com duas WLANs (canal HF *good* e com diversidade).

Verifica-se que a perda de pacote extremo a extremo subiu para cerca de 4% e 8% para os casos de uma ou duas WLANs, respectivamente. Esta subida da perda de pacote verifica-se relativamente ao estudo efectuado apenas para o canal HF (ver comparativamente com Figura 18 e Figura 19). Para o caso analisado nesta secção, no cenário S11 da Tabela 10, a perda de pacote na rede WLAN ronda os 4,4%.

Este capítulo termina com a análise do sistema constituído pelas duas redes sem fios estudadas ao longo da dissertação. O capítulo seguinte é reservado às conclusões globais resultantes deste trabalho.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A integração dum sistema de comunicações multimédia que forneça um serviço extremo a extremo sobre redes heterogéneas com diferentes débitos, atrasos e perda de pacote é um grande desafio. Para enfrentar este desafio, um estudo cuidadoso do comportamento de cada rede em separado é a abordagem que parece mais adequada. Ao longo do trabalho são encontradas soluções para as várias adversidades, impostas pela conjugação das diversas variáveis associadas às redes em separado e em conjunto.

O estudo do canal HF permite a escolha do melhor modo de comunicação minimizando a perda de informação. O baixo débito conseguido pelo canal HF torna quase impossível o envio de vídeo natural. Razão pela qual se opta pelo envio de parâmetros de face. Os atrasos introduzidos pelo modem HF, também representam um problema para a comunicação em tempo real. Verifica-se, por simulação, que para o dimensionamento dos pacotes apresentado e quando o canal HF permanece em condições *good*, é possível comunicar com perda de pacotes inferiores a 5% (para um SNR superior a 15 dB recorrendo à modulação 8PSK e sem correcção de erros). O uso duma solução de diversidade de canal representa uma melhoria significativa, permitindo uma comunicação com perda de pacotes também inferior a 5% (usando um SNR superior a 15 dB mas podendo usar dois moduladores, 8PSK e 16QAM). Embora, não nas melhores condições, conseguiu-se a comunicação multimédia sobre a infra-estrutura de rede HF da Marinha de Guerra Portuguesa, para os casos apresentados no quinto capítulo da presente dissertação.

A rede 802.11g, para débitos fonte baixos, tem um desempenho aceitável, mesmo estando em situações de sobrecarga de rede. O modelo conseguido revela ser melhor do que o GE para os cenários estudados, e pode servir para futuros estudos de desempenho de comunicações multimédia sobre a rede 802.11g. Mostra-se também que para esta rede a perda de pacote não é dependente do débito de bit fonte, mas sim do débito de pacote fonte. Verifica-se ainda que para débitos de transmissão de pacotes próximos dos débitos estudados para o canal HF, a percentagem de perda de pacote é inferior a 5%, segundo um cenário de sobrecarga da rede WLAN a rondar os 12 Mbps de *payload* dos pacotes RTP. Estas condições extremas de sobrecarga, embora reais não se verificam com regularidade, sendo a perda de pacotes em condições normais quase nula. Embora não estudado formalmente, verifica-se que os atrasos experimentados na rede WLAN são desprezáveis comparativamente com os atrasos observados na rede HF.

A análise de ambas as redes em conjunto revela, que para uma relação sinal ruído superior a 25 dB e permanecendo o canal HF em condições *good*, a perda de pacotes ronda os 10% na comunicação multimédia extremo a extremo. Estes valores são obtidos aplicando a solução de diversidade na frequência proposta neste trabalho e com um tráfego adicional da ordem dos 12 Mbps nas redes locais. No que diz respeito ao atraso da comunicação, o canal HF é o elemento constrangedor do sistema. Conversas informais com Engenheiros da Marinha revelaram que é já usual este tipo de constrangimentos em comunicações HF. Para minimizar os efeitos dos atrasos nas comunicações existe um protocolo de comunicação verbal para sinalização das conversas, recorrendo a expressões internacionalmente conhecidas. Exemplos destas expressões são “*over*” ou “*out*” para terminar uma frase que espera resposta ou terminar uma conversa, respectivamente.

Saliente-se o facto da importância de conhecer o comportamento das redes utilizadas para comunicações multimédia. Por exemplo, é de evitar codificação preditiva e devem-se usar técnicas de cancelamento na recepção. Para além disso, podem-se usar técnicas de protecção de parâmetros mais importantes que conduzem em caso de erro de transmissão a uma perda de qualidade mais significativa. Um bom exemplo deste tipo de protecção de parâmetros é o artigo [55], no qual se avaliam os parâmetros de codificação de voz do algoritmo HVXC identificando os mais significativos. Estes parâmetros são posteriormente protegidos na transmissão conseguindo aumentar a qualidade da voz em cerca de 15.54%. O exemplo acabado de descrever é uma razão para investir no estudo do

comportamento das redes de comunicações, como se realizou nesta dissertação para as duas redes sem fios.

Como nota final, e a pensar em futuros desenvolvimentos deste sistema de comunicações, o problema do atraso associado ao preenchimento dos pacotes de voz na rede HF deixa de ter tanta relevância, caso se use a codificação de imagens naturais, já que o débito necessário para o vídeo será superior ao da voz. Em consequência, a razão da informação útil relativamente aos cabeçalhos poderá aumentar.

Com a recente disponibilidade do uso de dois canais HF por parte da Marinha de Guerra Portuguesa, prevê-se a possibilidade de transmitir vídeo natural usando a modulação ISB (*Independent Side Band*).

REFERÊNCIAS

- [1] J. Postel, “*IP: Internet Protocol*”, RFC 791, Darpa Internet Program Protocol Specification, 1981.
- [2] S. Deering and R. Hinden, “*Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*”, RFC 2460, Network Working Group Request for Comments, 1998.
- [3] Rosenberg, et al, “*SIP: Session Initiation Protocol*”, RFC 3261, Network Working Group Request for Comments, 2002.
- [4] H. Schulzrinne, A. Rao and R. Lanphier, “*RTSP: Real Time Streaming Protocol*”, RFC 2326, Network Working Group Request for Comments, 1998.
- [5] H. Schulzrinne et al, “*RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*”, RFC 3550, Network Working Group Request for Comments, 2003.
- [6] J. Postel, “*Transmission Control Protocol*”, RFC 793, Darpa Internet Program Protocol Specification, 1981.
- [7] T. Turletti and C. Huitema, “*RTP Payload Format for H.261 Video Streams*”, RFC 2032, Network Working Group Request for Comments, 1996.
- [8] D. Hoffman, G. Fernando, V. Goyal and M. Civanlar, “*RTP Payload Format for MPEG1/MPEG2 Video*”, RFC 2250, Network Working Group Request for Comments, 1998.
- [9] Y. Kikuchi, T. Nomura, S. Fukunaga, Y. Matsui and H. Kimata, “*RTP Payload Format for MPEG-4 Audio/Visual Streams*”, RFC 3016, Network Working Group Request for Comments, 2000.

- [10] S. Wenger, M.M. Hannuksela, T. Stockhammer, M. Westerlund and D. Singer “*RTP Payload Format for H.264 Video*”, RFC 3984, Network Working Group Request for Comments, 2005.
- [11] David L. Miles, “*Network Time Protocol (Version 3) Specification, Implementation and Analysis*”, RFC 1305, Network Working Group Request for Comments, 1992.
- [12] M. Handley and V. Jacobson, “*SDP: Session Description Protocol*”, RFC 2327, Network Working Group Request for Comments, 1998.
- [13] J. Postel, “*UDP: User Datagram Protocol*”, RFC 768, Network Working Group Request for Comments, 1980.
- [14] S. Casner and V. Jacobson, “*Compressing IP/UDP/RTP Headers for Low-Speed Serial Links*”, RFC 2508, Network Working Group Request for Comments, 1999.
- [15] MPEG-4 Speech Group. Information Technology, “*Very Low Bitrate Speech-Visual Coding: Part 3 – Speech*”, ISO/IEC FCD 14496-3, 1998.
- [16] MPEG-4 Video Group, Information Technology, “*Coding of Speech-Visual Objects: Part 2 – Visual*”, ISO/IEC FCD 14496-2, 2001.
- [17] MPEG-4 Video Group. Information Technology, “*Very Low Bitrate Audio-Visual Coding: Part 5*”, Reference Software. ISO/IEC 14496-5, 2001. Disponível: http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/ISO_IEC_14496-5_2001_Software_Reference/video.zip.
- [18] MPEG-4 Audio Group. Information Technology, “*Very Low Bitrate Audio-Visual Coding: Part 5*”, Reference Software. ISO/IEC 14496-5, 2001. Disponível: http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/ISO_IEC_14496-5_2001_Software_Reference/audio.zip.
- [19] STANAG 5066, “*Profile for High Frequency (HF) Radio Data Communications*”, North Atlantic Treaty Organization, Ratification Request, 1999.
- [20] STANAG 4539, “*Technical Standards for Non-Hopping HF Communications Waveforms*”, North Atlantic Treaty Organization, Ratification Request, 2000.
- [21] CCIR, “*Use of High Frequency Ionospheric Channel Simulators*”, Recommendation 520-2, 1992.

- [22] Harris, “*RF-5710A HF/LF MODEM Intermediate Maintenance Manual*”, Número de Publicação: 10515-0135-4300, Março 2001, Rev. D.
- [23] A. Navarro, R. Rodrigues, J. Angeja, J. Tavares, L. Carvalho, F. Perdigão, “*An Error-resilient Approach for Real-time Packet Communications by HF-channel Diversity*”, SPIE – Digital Wireless Communications, Orlando, Florida, USA, Abril 2004.
- [24] J. Tavares, J. Angeja, L. Carvalho, A. Navarro, “*Increasing HF Radio Communication Capacity to Support Real Time Video*”, ISCE, Macau, China, Junho 2005.
- [25] IEEE 803.3 Part 3, “*Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*,” IEEE, 2002.
- [26] IEEE 802.11 Part 11, “*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*,” IEEE, 1999.
- [27] M. Rostami, J. Angeja, J. Tavares and A. Navarro, “*HF Channel Modeling for Real Time Packet Transmission*”, SPIE - Digital Wireless Communications, Orlando, Florida USA, Abril 2003.
- [28] C.C. Watterson et al, “*Experimental Confirmation of an HF Channel Model*”, IEEE Trans. Commun. Technol., vol. 18, pp. 792-803, 1970.
- [29] A. Navarro, R. Rodrigues, J. Angeja, J. Tavares, L. Carvalho and F. Perdigão, “*Video Conference over HF Packet Radio Channels*”, MILCOM – Military Communications Conference, Boston USA, Outubro 2003.
- [30] A. Navarro, R. Rodrigues, J. Angeja, J. Tavares, L. Carvalho, F. Perdigão, “*Multi-Conference over HF Packet Radio Channels*”, IEEE ICME, Taipei-Taiwan, Junho 2004.
- [31] E. N. Gilbert, “*Capacity of a burst-noise channel*,” Bell Syst. Tech. J., vol. 39, pp. 1253-1265, Sept. 1960.
- [32] E. O. Elliott, “*Estimates of error rates for codes on burst-noise channels*,” Bell Syst. Tech. J., vol. 42, pp. 1977-1997, Sept. 1963.
- [33] IEEE 802.11g Part 11, “*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Further higher data rate extension in the 2.4 GHz band*,” IEEE, 2003.

- [34] J. E. Yee and E. J. Weldon, "Evaluation of the performance of error-correcting codes on a Gilbert channel," IEEE Trans. Com., vol. 43, N. 8, pp. 2316-2323, Nov. 1989.
- [35] M. Mushkin and I. Bar-David, "Capacity and coding for the Gilbert-Elliott channels," IEEE Trans. on Inform. Theory, vol. 35, pp. 1277-1290, Nov. 1989.
- [36] J. Garcia-Frias and J. Villasenor, "Turbo decoding of Gilbert-Elliott channels", IEEE Trans. Com., vol. 50, N. 3, pp. 357-363, Mar. 2002.
- [37] S. Gnani et al, "Rate allocation for video transmission over lossy correlated networks," Electronics Letters, vol. 38, N. 20, pp. 1171-1172, Sept. 2002.
- [38] ISO/IEC 14496-10, ITU-T Rec. H.264, "Advanced video coding for generic audiovisual services," May 2004.
- [39] M. Grangetto, E. Magli, and G. Olmo, "Ensuring quality of service for image transmission: Hybrid loss protection," IEEE Trans. on Image Processing, vol. 13, N. 6, pp. 751-757, Jun. 2004.
- [40] A. Said and W. Pearlman, "A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees," IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technol., vol. 6, pp. 243-250, Jun. 1996.
- [41] A. Skodas, C. Christopoulos and T. Ebrahimi, "The JPEG 2000 still image compression standard," IEEE Signal Processing Mag., vol 18, pp. 36-58, Sept. 2001.
- [42] H. Wang and N. Moayeri, "Finite-state Markov channel-A useful model for radio communications channels," IEEE Trans. on Veh. Technol., vol. 44, N. 1, pp. 163-171, Feb. 1995.
- [43] A. Kopke, A. Willig, and H. Karl, "Chaotic maps as parsimonious bit error models of wireless channels," in Proc. IEEE INFOCOM, San Francisco, CA, Mar. 2003, pp. 513-523.
- [44] IEEE 802.11b Part 11 "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band," IEEE, 1999.
- [45] J. Angeja, L. Carvalho, A. Navarro, "802.11g WLAN Modeling for Real Time Packet Communication", PIMRC, Barcelona, Espanha, Setembro 2004.

- [46] J. Angeja, L. Carvalho, A. Navarro, “*Real Time Packet Communication Modeling in 802.11g WLAN*”, IST Mobile & Wireless Communications Summit, Lion, França, Julho 2004.
- [47] L. Carvalho, J. Angeja, A. Navarro, “*A New Packet Loss Model of the IEEE 802.11g Wireless Network for Multimedia Communications*”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 51, No. 3, Agosto 2005.
- [48] L. Wilhelmsson and L. Milstein, “*On the effect of imperfect interleaving for the Gilbert-Elliott channel*”, IEEE Trans. Com., vol. 47, N. 5, pp. 681-688, May 1999.
- [49] J. Neter, W. Wasserman, and G. Whitmore, *Applied Statistics*, Allyn and Bacon, 1992, pp. 482-492.
- [50] IEEE 802.11a Part 11 “*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-speed physical layer extension in the 5 GHz band*”, IEEE, 1999.
- [51] ETSI TR 101 031 V2.2.1 “*Broadband Radio Access Networks (BRAN); High Performance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 2; Requirements and architectures for wireless broadband access*”, 1999.
- [52] ETSI TR 101 683 V1.1.1 “*Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; System Overview*”, 2000.
- [53] R. Rodrigues, A. Navarro, F. Perdigão, “*MPEG-4 HVXC and iLBC Assessment over 802.11g WLAN*”, IST Wireless & Mobile Communications Summit, Lion, França, Julho 2004.
- [54] A. Navarro, F. Perdigão, “*V²oWLAN - Is Voice the Killer Application?*”, Wireless Communication Symposium, Lisboa, Janeiro 2004.
- [55] R. Rodrigues, F. Perdigão, A. Navarro, “*Significance Analysis of MPEG-4 HVXC Elements at High Frequencies*”, V Conference on Telecommunications, Tomar, Portugal, Abril 2005.
- [56] Global IP Sound, “*Internet Low Bit Rate Codec*”, Internet Draft: draft-ietf-avt-ilbc-codec-04.txt, 2003.

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

ALM	<i>Automatic Link Maintenance</i>
AP	<i>Access Point</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CAS	<i>Channel Access Sublayer</i>
CFP	<i>Contention Free Period</i>
CP	<i>Contention Period</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Checksum</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
CW	<i>Contention Window</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i>
DRC	<i>Data Rate Change</i>
DS	<i>Distribution System</i>
DTE	<i>Data Terminal Equipment</i>
DTS	<i>Data Transfer Sublayer</i>
FAPs	<i>Face Animation Parameters</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
HF	<i>High Frequency</i>

HVXC	<i>Harmonic Vector eXcitation Coding</i>
IBSS	<i>Independent Basic Service Set</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
ISB	<i>Independent Side Band</i>
iLBC	<i>Internet Low Bit Rate Coding</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
LSD	<i>Logarithmic Series Distribution</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
MSDU	<i>MAC Service Data Unit</i>
NAVIO	<i>Navy Video</i>
MOS	<i>Mean Opinion Score</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
PC	<i>Personal Computer; Point Coordinator</i>
PCF	<i>Point Coordination Function</i>
PIFS	<i>PCF Interframe Space</i>
PR	<i>Packet Rate</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RFC	<i>Request For Comments</i>
RTCP	<i>RTP Control Protocol</i>
RTP	<i>Real Time Transport Protocol</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
RTSP	<i>Real Time Streaming Protocol</i>
SDP	<i>Session Description Protocol</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i>
SIS	<i>Subnetwork Interface Sublayer</i>
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i>
STANAG	<i>Standardisation Agreement</i>

TBTT	<i>Time Beacon Transmission Time</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TRIVIAL	Transmissão Rádio Interactiva de Video Local
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
Wi-Fi	<i>Wireless-Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>